

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ARGEU LEONIDAS MAIOLI PRETTI

**INTEROPERABILIDADE BIM E BEM: AVALIAÇÃO DE
EFICIÊNCIA DO SISTEMA NA ANÁLISE ENERGÉTICA DE
EDIFÍCIOS**

VITÓRIA
2018

ARGEU LEONIDAS MAIOLI PRETTI

INTEROPERABILIDADE BIM E BEM: AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA DO SISTEMA NA ANÁLISE ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr Ing. João Luiz Calmon
Nogueira da Gama
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Cristina Engel de
Alvarez

VITÓRIA
2018

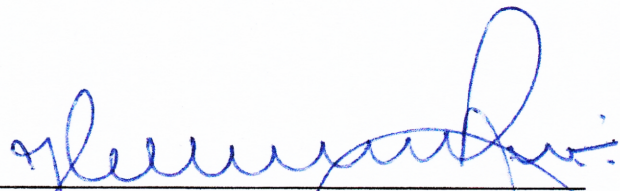
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

INTEROPERABILIDADE BIM E BEM: AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA DO SISTEMA NA ANÁLISE ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS

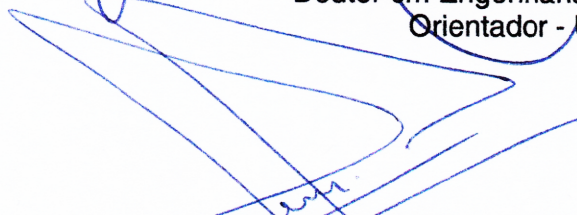
Argeu Leonidas Maioli Pretti

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

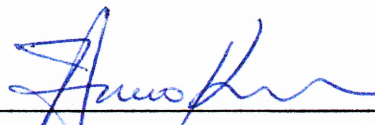
Aprovada no dia **29 de junho de 2018** por:



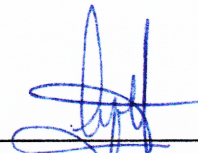
Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Doutor em Engenharia Civil
Orientador - UFES



Profa. Dra. Cristina Engel de Alvarez
Doutora em Arquitetura e Urbanismo
Coorientadora e Examinadora Interna - UFES



Profa. Dra. Edna Aparecida Nico Rodrigues
Doutora em Arquitetura e Urbanismo
Examinadora Externa - UFES



Profa. Dra. Cynthia Marconsini Loureiro Santos
Doutora em Arquitetura
Examinadora Externa - UVV

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

- P942i Pretti, Argeu Leonidas Maioli, 1975-
Interoperabilidade BIM e BEM : avaliação de eficiência do sistema na análise energética de edifícios / Argeu Leonidas Maioli Pretti. – 2018.
210 f. : il.
- Orientador: João Luiz Calmon Nogueira da Gama.
Coorientador: Cristina Engel de Alvarez.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.
1. Modelagem de informação da construção (BIM).
2. Modelagem energética da edificação (BEM). 3. Eficiência energética. 4. Interoperabilidade. 5. Formato IFC. 6. Formato gbXML. I. Gama, João Luiz Calmon Nogueira da. II. Alvarez, Cristina Engel de. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama pelos ensinamentos, paciência pelos meus desaparecimentos e oportunidade de pesquisar o tema.

À Prof.^a Dr.^a Cristina Engel de Alvarez, minha coorientadora, pelas conversas informais no LPP e pela disponibilidade de ler um assunto fora do seu universo de pesquisa.

Aos membros da banca, por aceitarem participar da avaliação deste trabalho e por compartilhar seus conhecimentos nesta ocasião.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFES.

Às professoras Cristina Engel de Alvarez e Cynthia Marconsini Loureiro Santos pelas importantes contribuições na etapa de qualificação.

Aos colegas do mestrado pelas parcerias nos trabalhos e discussões gerais.

À minha mãe, irmã e sobrinhos por compreenderem as minhas ausências e apoiarem esta etapa.

À Fernanda, pelo apoio, força, parceria, compreensão e paciência nesta etapa importante e conturbada de nossa vida. Também por possibilitar momentos exclusivos de dedicação ao mestrado, que juntamente com a minha sogra, Dona Dilene, compreenderam e minimizaram a minha ausência com os meus filhos.

E falando neles, aos guris da minha vida, Benjamin e Joaquim, que trouxeram alegria e agitação às nossas vidas, exatamente no momento mais tranquilo.

BIM E INTEROPERABILIDADE: AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA DO SISTEMA NA ANÁLISE ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS

RESUMO

A crescente demanda energética impõe quebra de paradigmas no que diz respeito às questões das fontes geradoras e os meios de tornar a sua utilização mais sustentável. A indústria da construção civil possui o papel importante, considerando que o consumo energético do setor é bastante significativo em todo o ciclo de vida de uma edificação, no entanto, uma série de ferramentas tem surgido com intuito de tornar o setor de Arquitetura, Engenharia e Construção – AEC, mais eficiente e com menor impacto ambiental, sendo o *Building Information Modeling* – BIM e os programas de modelagem energética da edificação (BEM – *Building Energy Modeling*) integrantes deste grupo. A pesquisa avaliou o desempenho da interoperabilidade entre as ferramentas do BIM e BEM após o compartilhamento dos modelos Referência e Ajustado, e os seus parâmetros calculados pelo Método Prescritivo do RTQ-C. Os modelos criados da edificação padrão tiveram as suas envoltórias detalhadas na ferramenta do BIM da Autodesk®, o Revit® Architecture e compartilhados com as ferramentas BEM – Green Building Studio; EnergyPlus; eQUEST; DesignBuilder; IES-VE; OpenStudio e Insight por meio de dois formatos padrões de interoperabilidade, IFC e gbXML, e os derivados do gbXML – IDF e INP. Três ferramentas não realizaram as simulações após a interoperabilidade, sejam importando arquivos gbXML e IFC ou carregando os arquivos IDF e INP. Entre as ferramentas que realizaram as simulações, somente o EnergyPlus apresentou resultado coerente e consistente após carregar os arquivos IDF derivados do gbXML da ferramenta Green Building Studio e do plugin Insight.

Palavras-chave: Interoperabilidade, BIM, BEM, IFC, gbXML, eficiência energética.

BIM E INTEROPERABILIDADE: AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA DO SISTEMA NA ANÁLISE ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS

ABSTRACT

The growing energy demand imposes a paradigm shift with regard to issues of generating sources and the means to make their use more sustainable. The construction industry plays an important role, considering that the energy consumption of the sector is very significant throughout the life cycle of a building, however, a series of tools have arisen with the purpose of making the Architecture, Engineering and Construction - AEC more efficient and with less environmental impact, being Building Information Modeling (BIM) and the Building Energy Modeling (BEM) programs that are part of this group. The research seeks to evaluate the interoperability performance between the BIM and BEM tools after the sharing of the Reference and Adjusted models, and their parameters calculated by the RTQ-C Prescriptive Method. The models created from the standard building had their wrappers detailed in the BIM Autodesk® Revit® tool and shared with the BEM tools - Green Building Studio; EnergyPlus; eQUEST; DesignBuilder; IES-VE; OpenStudio and Insight through the two standard formats of interoperability, IFC and gbXML, and the derivatives of gbXML - IDF and INP. Three tools did not perform simulations after interoperability, either importing gbXML and IFC files or loading the IDF and INP files. Among the tools that performed the simulations, only EnergyPlus presented coherent and consistent results after loading the IDB files derived from gbXML from the Green Building Studio tool and the Insight plugin.

Keywords: BIM, BEM, interoperability, IFC, gbXML, energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: ENCE completo.....	30
Figura 2: ENCE parcial envoltória	30
Figura 3: Agrupamento das Zonas Bioclimáticas	34
Figura 4: Ilustração do cálculo de IC	37
Figura 5: Porcentagem de aumento de custo devido à falta de interoperabilidade ...	74
Figura 6: Evolução das versões do IFC	77
Figura 7: Evolução cronológica do gbXML	79
Figura 8: Dimensões BIM	81
Figura 9: Percentual das categorias contempladas.....	83
Figura 10: Percentual de duas ou mais categorias contempladas	84
Figura 11: Publicações distribuídas nos anos	85
Figura 12: Representação esquemática da metodologia	93
Figura 13: Mapa do Zoneamento Bioclimático do Brasil e localização de Vitória.....	94
Figura 14: Vitória e seus limites	95
Figura 15: Modelo com 50% da fachada envidraçada	96
Figura 16: Modelo fachada 50% Norte/Sul.....	96
Figura 17: Fluxo de compartilhamento entre BIM e BEM dos modelos.....	104
Figura 18: Vedação vertical Modelo Referência.....	111
Figura 19: Vedação horizontal Modelo Referência.....	111
Figura 20: Vedação vertical Modelo 3	114
Figura 21: Vedação horizontal Modelo 3.....	114
Figura 22: Comparativo entre os Modelos Referência e Ajustado	116
Figura 23: Planta pavimento tipo.....	119
Figura 24: Perspectiva norte/oeste.....	120
Figura 25: Perspectiva sul/leste	120
Figura 26: Ambientes internos.....	122
Figura 27: Espaços internos.....	122
Figura 28: Tipos de espaços e parâmetros	124
Figura 29: Parâmetros ocupação e iluminação	125
Figura 30: Zonas de AVAC	125
Figura 31: Configurações de energia dos modelos	127
Figura 32: Configurações avançadas de energia	128
Figura 33: Tipo de construção.....	129

Figura 34: Ocupações dias úteis, sábado e domingo.....	130
Figura 35: Condutividade térmica dos materiais	133
Figura 36: Elementos de composição da alvenaria.....	133
Figura 37: Parâmetros das alvenarias externas	134
Figura 38: Propriedades da cobertura.....	135
Figura 39: Propriedades esquadrias	136
Figura 40: Parâmetros das alvenarias externas	137
Figura 41: Elementos da cobertura vegetativa	138
Figura 42: Parâmetros cobertura vegetativa	138
Figura 43: Propriedades esquadrias	139
Figura 44: Modelo de energia.....	140
Figura 45: Comandos de interação direta Revit e GBS.....	143
Figura 46: Resultados simulações por compartilhamento direto	144
Figura 47: Simulações realizadas pelo GBS	145
Figura 48: Comandos do Insight.	146
Figura 49: Interface Insight – comparativo edificações	146
Figura 50: Extensões de importação suportadas pelo OpenStudio.....	148
Figura 51: Plugin OpenStudio no SketchUP 2016.....	148
Figura 52: Notificações erro importação arquivos gbXML e IDF.	149
Figura 53: Interface gráfica EnergyPlus para Windows.....	150
Figura 54: Localização diferente do modelo do Revit.....	151
Figura 55: Materiais da envoltória e suas propriedades térmicas.	152
Figura 56: Propriedades dos vidros das esquadrias	153
Figura 57: Criação do projeto de simulação	154
Figura 58: Edificação importada e propriedades da envoltória.....	155
Figura 59: Localização e mecanismo de simulação.	156
Figura 60: Modelos Referência e Ajustado com as partes suprimidas da alvenaria.	157
Figura 61: Elementos da envoltória presentes no modelo	158
Figura 62: Camadas dos elementos alvenaria e cobertura	159
Figura 63: Transmitância térmica da alvenaria e da cobertura e fator solar dos vidros	159
Figura 64: Importação do modelo Ajustado impossibilitado pela ferramenta	161
Figura 65: Modelo Referência e localização corrigida.....	161

Figura 66: Componentes da envoltória e suas transmitâncias térmicas	162
Figura 67: Mensagem de erro ao executar a simulação	163
Figura 68: IFC importado e mensagem de falha na simulação	163
Figura 69: Gráfico das áreas do modelo Referência	166
Figura 70: Modelo Referência - consumo energético total anual (kWh).	167
Figura 71: Modelo Referência - consumo energético total anual por área (kW/m ²).	167
Figura 72: Modelo Referência - consumo energético anual por uso (kWh).....	168
Figura 73: Modelo Referência - consumo energético por área (kW/m ²)	169
Figura 74: Modelo Ajustado - Gráfico das áreas do modelo Ajustado.....	170
Figura 75: Modelo Ajustado - consumo energético total anual (kWh).	171
Figura 76: Modelo Ajustado - consumo energético total anual por área (kW/m ²).	172
Figura 77: Modelo Ajustado - consumo energético anual por uso (kWh).....	172
Figura 78: Modelo Ajustado - consumo energético por área (kW/m ²)	174
Figura 79: Comparação das áreas dos modelos Referência e Ajustado.....	175
Figura 80: Comparação do consumo energético total anual	176
Figura 81: Comparação do consumo energético anual separado por disciplinas ...	177
Figura 82: Comparação do consumo energético por área separado por disciplinas	179

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Documento PROCEL Edifica vigentes	31
Quadro 2: Equações para cálculo das propriedades térmicas da envoltória.....	37
Quadro 3: Definições das variáveis da equação de cálculo IC_{env}	39
Quadro 4: Termos utilizados relativos a <i>Building Information Modeling</i>	55
Quadro 5: Lista de guias publicamente disponíveis, relatórios e visões relativas ao BIM.....	60
Quadro 6: Aplicações do BIM.....	65
Quadro 7: O uso do BIM	67
Quadro 8: Aspectos favoráveis e desfavoráveis para a adoção do BIM	70
Quadro 9: As 12 empresas fundadoras da IAI	76
Quadro 10: Determinadas entidades IFC e suas propriedades.....	78
Quadro 11: Empresas que compõem a diretoria da Open Green Building XML Schema	80
Quadro 12: Publicações relevantes que abordam o compartilhamento, padrões e sustentabilidade (continua).....	82
Quadro 13: Características construtivas do edifício	97
Quadro 14: Padrão de uso, ocupação e equipamentos do edifício.....	98
Quadro 15: Parâmetros de controle constantes	100
Quadro 16: Parâmetros variáveis dos modelos.....	100
Quadro 17: Autores que pesquisaram os padrões de referência utilizados pelos programas de simulação para interoperabilidade (continua).....	102
Quadro 18: Características dos esquemas IFC e gbXML utilizados	103
Quadro 19: Motores de simulação e características principais dos programas.....	105
Quadro 20: Programas BEM aprovados na ASHRAE 140	106
Quadro 21: Características básicas modelos.....	118
Quadro 22: Uso, ocupação e demandas energéticas.	121
Quadro 23: Parâmetros e propriedades das zonas AVAC	126
Quadro 24: Relação dos modelos com os programas BEM.....	141
Quadro 25: Matriz de interoperabilidade BIM e BEM	142
Quadro 26: Ferramentas que não realizaram as simulações.....	164

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação geral da edificação RTQ-C	33
Tabela 2: Parâmetros do IC_{\min}	36
Tabela 3: Parâmetros do $IC_{\max D}$	36
Tabela 4: Limites dos intervalos dos níveis de eficiência	36
Tabela 5: Transmitância térmica de cobertura (U_{COB}) para os diferentes níveis de eficiência e Zonas Bioclimáticas	37
Tabela 6: Transmitância térmica das paredes (U_{PAR}) para os diferentes níveis de eficiência e Zonas Bioclimáticas	38
Tabela 7: Relação entre áreas de ambientes e áreas de controle independente	42
Tabela 8: Transmitância Térmica paredes externas	47
Tabela 9: Capacidade Térmica paredes externas	47
Tabela 10: Transmitância Térmica coberturas	47
Tabela 11: Limite de transmitância térmica, pré-requisito para classificação no nível A do RTQ-C	99
Tabela 12: Característica da Edificação Padrão	108
Tabela 13: Dados para Cálculo do FF e FA	109
Tabela 14: Esquadrias utilizadas no modelo	109
Tabela 15: Dados para o IC_{env}	110
Tabela 16: Parâmetros do IC_{\min}	110
Tabela 17: Parâmetros do $IC_{\max D}$	110
Tabela 18: Resistências térmicas interna e externa	111
Tabela 19: Características dos componentes do Modelo Referência	112
Tabela 20: Classificação do Modelo Referência em relação à Transmitância e Absortância	112
Tabela 21: Classificação dos vidros	112
Tabela 22: Classificação envoltória Modelo Referência	113
Tabela 23: Características dos componentes do Modelo Ajustado	114
Tabela 24: Classificação Modelo Ajustado em relação à Transmitância e Absortância	115
Tabela 25: Classificação dos vidros	115
Tabela 26: Classificação envoltória Modelo Referência	115
Tabela 27: Fator Solar e IC_{env} dos Modelos Referência e Ajustado	116
Tabela 28: Parâmetros e propriedades dos espaços	123

Tabela 29: Sistema de climatização	130
Tabela 30: Modelo referência - variáveis de teste e seus valores.....	132
Tabela 31: Modelo ajustado - variáveis de teste e seus valores	136
Tabela 32: Tabela comparação da classificação dos modelos em relação às áreas de cada método.....	165

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCB	Building Code of Australia
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Área de Piso dos Ambientes Condicionados
AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
AECO	Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação
A_{env}	Área da envoltória
AGC	Associated General Contractors of America
AHS	Ângulo Horizontal de Sombreamento
ANC	Área de Piso dos Ambientes Não Condicionados
ANSI	American National Standards Institute
A_{pcob}	Área de projeção da cobertura
A_{pe}	Área de projeção do edifício
APT	Área de Piso dos Ambientes de Permanência Transitória
AQUA	Alta Qualidade Ambiental
AsBEA	Associação Brasileira dos Escritórios de Arquitetura
ASHAE	American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASRE	American Society of Refrigerating Engineers
A_{tot}	Área total construída
AU	Área Útil
AVAC & R	Aquecimento, Ventilação, Ar Condicionado & Refrigeração
AVS	Ângulo Vertical de Sombreamento
BEM	Building Energy Modeling
BEST-D	Building Energy Simulation Tools
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer Aided Design
CT	Capacidade Térmica
CIB	Innovation in Building and Construction
DPI	Densidade de Potência de Iluminação
DPIL	Densidade de potência de iluminação limite
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

EqNum	Equivalentes Numéricos
EqNumCA	Equivalente Numérico do Sistema de Condicionamento de Ar
EqNumDPI	Equivalente Numérico do Sistema de Iluminação
EqNumEnv	Equivalente Numérico da Envoltória
EqNumV	Equivalente Numérico de Ambientes Ventilados Naturalmente
EUA	Estados Unidos da América
FA	Fator Altura
FF	Fator de Forma
FS	Fator Solar
FV	Fator Ventilação
GBS	Green Building Studio
gbXML	Green Building XML
HQE	Haute Qualité Environnementale
HTML	HyperText Markup Language
HVAC & R	Heating, Ventilating, Air Conditioning and Refrigeration
IAI	International Alliance for Interoperability
IBC	Innovation in Building and Construction
IBPSA	International Building Performance Simulation Association
IC _{env}	Indicador de Consumo da envoltória
IC _{maxD}	Indicador de Consumo máximo da volumetria
IC _{min}	Indicador de Consumo mínimo
IES-VE	Integrated Environmental Solutions - Virtual Environment
IFC	Industry Foundation Classes
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
LABEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MPOG	Ministério de Planejamento Orçamento e Gestão
NBR	Norma Brasileira
NIBS	National Institute of Building Sciences
NIST	U.S National Institute of Standards and Technology
NREL	National Renewable Energy Lab
PAF _T	Percentual de Abertura na Fachada total
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem

PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PT	Pontuação Final
R	Resistência Térmica
RAC	Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações Residencial, Comercial, de Serviço e Público.
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos.
SLTI	Secretaria de Logística e Tecnologia da Informação
TI	Tecnologias da Informação
TIC	Tecnologia de Informação e Construção
U	Transmitância Térmica
U_{COB}	Transmitância térmica de cobertura
U_{PAR}	Transmitância térmica das paredes
US-DOE	U.S. Department of Energy
US-GSA	U. S. General Services Administration
V_{tot}	Volume total da edificação
XML	eXtensible Markup Language

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	20
1.2. QUESTÕES DA PESQUISA	21
1.3. OBJETIVOS	22
1.3.1. Objetivo Geral.....	22
1.3.2. Objetivos Específicos	22
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
2.1.1. Eficiência energética nas edificações.....	25
2.1.2. Regulamento técnico da qualidade do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos – RTQ-C	28
2.1.3. ASHRAE Handbook – Fundamentals.....	42
2.1.4. NBR 15575 – Edificações habitacionais – Desempenho	46
2.1.5. Análise energética por simulação	48
2.1.6. BIM – Building Information Modeling.....	51
2.1.7. Interoperabilidade	71
2.2. PESQUISAS REALIZADAS EM INTEROPERABILIDADE ENTRE BIM E BEM 80	
3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	93
3.1. SELEÇÃO DA CIDADE	94
3.2. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO REFERÊNCIA	95
3.2.1. Definição dos parâmetros de controle e as variáveis para as simulações ...	99
3.3. PROGRAMAS DE MODELAGEM E ANÁLISE DE EFICIÊNCIA	101
4. CÁLCULO SEGUNDO MÉTODO PRESCRITIVO – CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS	108
4.1. CLASSIFICAÇÃO FINAL ENVOLTÓRIA MODELO REFERÊNCIA.....	111
4.2. CLASSIFICAÇÃO FINAL ENVOLTÓRIA MODELO AJUSTADO.....	113
5. MODELAGEM, INTEROPERABILIDADE E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA EDIFICAÇÃO	118
5.1. MODELAGEM DA EDIFICAÇÃO PADRÃO NA FERRAMENTA DO BIM..	118
5.2. CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DO MODELO PADRÃO	121
5.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS REFERÊNCIA E AJUSTADO	131

5.3.1. Modelo Referência	132
5.3.2. Modelo Ajustado	136
5.4. CRIAÇÃO DOS MODELOS DE ENERGIA	139
5.5. INTEROPERABILIDADE E SIMULAÇÕES ENERGÉTICAS NOS PROGRAMAS BEM.....	141
5.5.1. Green Building Studio – GBS.....	142
5.5.2. Insight.....	145
5.5.3. EnergyPlus.....	147
5.5.4. eQUEST	153
5.5.5. DesignBuilder.....	156
5.5.6. Integrated Environmental Solutions-Virtual Environment – IES-VE	160
5.6. ANÁLISES DOS RESULTADOS DA INTEROPERABILIDADE	164
5.6.1. Comparação intra-modelo.....	165
5.6.2. Comparação inter-modelos	175
6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS.....	182
REFERÊNCIAS.....	185
REFERÊNCIAS.....	186
APÊNDICE A: – MÉTODO PRESCRITIVO: MODELO REFERÊNCIA	201
APÊNDICE B: – MÉTODO PRESCRITIVO: MODELO AJUSTADO	206

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Mesmo incorporando novas tecnologias no processo produtivo, a indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) do Brasil mantém seu caráter conservador quando comparada aos demais segmentos da indústria. Seus projetos produzem grande quantidade de informações, contudo, há certa distância entre a pesquisa em tecnologia da informação aplicada à construção civil e os métodos realmente praticados pela indústria no cotidiano, principalmente no Brasil.

A busca por rápidos resultados imposta pelo mercado é um dos centros do problema da eficiência energética e o baixo desempenho das edificações. Os elementos de projeto e a forma de execução da obra podem resultar em construções pouco eficientes no quesito energético e de conforto térmico (GOMES 2007).

Em se tratando de eficiência energética nas edificações, a aplicação de novas tecnologias visando o compartilhamento e a gestão da informação, tende a contribuir para a redução do consumo de materiais e energia, o que torna benéfico o uso de tecnologias da informação da construção – TIC. Entretanto, a aplicabilidade das pesquisas em tecnologia da informação na construção civil deveriam ser maiores, tanto no Brasil, quanto nos demais países que buscam maior eficiência no setor (GARBINI, 2012).

Os sistemas fundamentados na tecnologia da Modelagem de Informações da Construção, ou *“Building Information Modeling”* – BIM, são considerados a evolução dos sistemas CAD tradicionais, pois gerenciam as informações do ciclo de vida de uma construção por meio de um conjunto de informações essenciais a um projeto, integrados à modelagem em três dimensões e ao modelo paramétrico da edificação, que fornece dados relativos às propriedades, comportamentos e interações dos componentes construtivos (CRESPO; RUSCHEL, 2007).

A seleção da ferramenta de modelagem energética mais adequada para atender às necessidades do projeto é de fundamental importância no resultado efetivo da

eficiência energética da edificação. A escolha desta ferramenta pode impactar na produtividade do projeto, sendo importante priorizar a interoperabilidade entre as ferramentas. Atualmente, existe um grande número dessas ferramentas de modelagem energética da edificação que estão disponíveis e que realizam simulações de eficiência energética e a interoperabilidade, podendo ocorrer diretamente, entre programas do mesmo fabricante, ou por extensões tais como o *Industry Foundation Classes* (IFC) e o *Green Building Scheme XML* (gbXML), que são as principais, e as derivadas do gbXML – IDF e INP.

Esta pesquisa pretende analisar os resultados obtidos das simulações computacionais de eficiência energética, provenientes de diferentes tipos de interoperabilidade entre as ferramentas do BIM e modelagem energética da edificação (BEM). Para isso, duas edificações foram modeladas na ferramenta Revit com o detalhamento dos componentes de suas envoltórias – paredes, cobertura e esquadrias, e a inserção das informações referentes às suas propriedades térmicas, como resistência, transmitância e condutividade, oriundas dos cálculos do Método Prescritivo do PROCEL Edifica realizados previamente para as duas edificações, e posteriormente compartilhadas com ferramentas BEM definidas. Desta forma, é possível verificar o grau de interferência da interoperabilidade no resultado final das simulações energéticas.

1.2. QUESTÕES DA PESQUISA

A interoperabilidade entre as ferramentas do BIM e BEM apresenta duas possibilidades em relação à análise de eficiência energética da edificação: a realização das simulações e a não realização das simulações. Desta forma, questões importantes para a pesquisa foram levantadas:

- 1) A interoperabilidade entre as ferramentas do BIM e as de modelagem energética das edificações (BEM), pode influenciar de forma considerável nos resultados finais das simulações realizadas?
- 2) Os dois formatos padrões de interoperabilidade, IFC e gbXML, e os derivados do gbXML – IDF e INP, utilizados no compartilhamento entre as ferramentas

do BIM e BEM impactam na realização das simulações e nos seus resultados?

- 3) Os modelos detalhados na ferramenta do BIM escolhida, o Autodesk® Revit®, contendo todas as informações térmicas dos componentes das envoltórias, quando compartilhados nos formatos IFC e gbXML, e os derivados do gbXML – IDF e INP com as ferramentas BEM – Green Building Studio; EnergyPlus; eQUEST; DesignBuilder; IES-VE; OpenStudio e Insight, preservam os dados para a realização das simulações?

Tais questões serão embasadas considerando os pressupostos adotados pelo RTQ-C, por meio dos seus dois métodos de avaliação – o Prescritivo e o de Simulação –, sendo o primeiro a referência para a comparação.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar o desempenho da interoperabilidade entre as ferramentas do BIM e BEM por meio dos resultados obtidos das simulações energéticas após o compartilhamento de dados, tendo como objetos dois modelos de uma mesma edificação, Referência e Ajustado, e os seus parâmetros calculados pelo Método Prescritivo do RTQ-C (PROCEL 2016).

1.3.2. Objetivos Específicos

- Revisar a bibliografia disponível acerca de eficiência energética, do conceito BIM, suas características e diferentes tipos de interoperabilidade e padrões com as ferramentas de modelagem energética da edificação (BEM);
- Definir a cidade onde será realizada a pesquisa em função do Zoneamento Bioclimático Brasileiro;
- Caracterizar construtivamente a edificação padrão comercial, assim como, o padrão de uso, ocupação e equipamentos utilizados;
- Calcular o nível de eficiência energética através do método prescritivo do RTQ-C para a caracterização dos modelos Referência e Ajustado;

- Definir os parâmetros de controle, as variáveis e as constantes dos modelos para as simulações;
- Selecionar, a partir de critérios específicos, as ferramentas para a modelagem e simulação e que atendam aos objetivos e à metodologia da pesquisa;
- Elaborar modelos paramétricos detalhados para realizar as interoperabilidades;
- Realizar simulações e comparar, analisar e avaliar os resultados.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Optou-se estruturar esta dissertação de forma que a utilização de apêndices fosse mínima para evitar as constantes interrupções para acessar certas informações, visando uma leitura linear e contínua de todo o conteúdo pesquisado e dos resultados encontrados. Desta forma, o texto está organizado em seis capítulos, conforme apresentado a seguir:

- O **capítulo 1**, a Introdução, apresentou o cenário geral do problema abordado na pesquisa, e onde são definidos os objetivos e a estrutura lógica de apresentação do trabalho;
- O **capítulo 2** corresponde à Revisão Bibliográfica que envolve o tema estudado, com especial ênfase para os aspectos relacionados à eficiência energética nas edificações, as normas nacionais e internacionais, os conceitos e características do BIM e a interoperabilidade;
- No **capítulo 3** são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados, a cidade e sua Zona Bioclimática, as escolhas dos *softwares* e os parâmetros adotados para as simulações, incluindo o modelo de edifício;
- O **capítulo 4** apresenta a caracterização das edificações de estudo como resultado dos cálculos do método prescritivo;
- No **capítulo 5** são criados os modelos das edificações na ferramenta do BIM, os processos de interoperabilidade e as simulações nas ferramentas BEM;
- No **capítulo 6** serão apresentadas as conclusões e propostas futuras.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo busca sintetizar a pesquisa acerca do tema, através do levantamento bibliográfico das principais fontes e assuntos abordados neste estudo, destacando-se que a revisão bibliográfica também forneceu subsídios para o estabelecimento do procedimento metodológico desta pesquisa. Para melhor entendimento de seu conteúdo, esta revisão foi dividida em: fundamentação teórica – abordando as questões de eficiência energética, regulamentos e normas nacionais e internacionais, análise energética por computadores, BIM, interoperabilidade e pesquisas realizadas em interoperabilidade entre BIM e BIM.

2.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1.1. Eficiência energética nas edificações

Os empenhos para redução do consumo de energia são destaques na busca da sustentabilidade no ambiente construído. Um dos principais desafios para a redução do uso de energia no ciclo de vida do edifício é conceber métodos que possam prever e caracterizar a demanda energética (LARSEN *et al* 2011 *apud* CHO *et al*, 2015).

O procedimento de análise do consumo de energia dos edifícios deve considerar as interações entre o edifício com todos os seus sistemas de engenharia e o ambiente. No caso de prédios comerciais e públicos, o condicionamento de ar e a iluminação artificial são os grandes responsáveis pelo consumo (MME, 2015). Segundo Neves e Caran (2003), a utilização cada vez maior de sistemas automatizados nas edificações está ligada à procura de fórmulas para economia de energia, principalmente nos edifícios comerciais, com a adoção indiscriminada de tipologias arquitetônicas importadas, geralmente impróprias para o clima brasileiro e que quase sempre buscam apenas a estética.

Geller (1994) *apud* Fossati e Lambert (2010, p.60) identificam cinco pontos positivos na conservação de eletricidade:

- O aumento da eficiência diminui custos;
- A conservação reduz a probabilidade de falta de eletricidade;
- A conservação de eletricidade reduz a necessidade de investimentos no setor público. Investir na eficiência do uso final é mais produtivo que construir usinas elétricas e linhas de transmissão;
- O aumento da eficiência na utilização da energia pode ajudar as indústrias e os produtos nacionais a competirem no mercado mundial;
- A conservação da eletricidade resulta em impactos ambientais e sociais muito mais favoráveis do que os do fornecimento (a construção de usinas hidroelétricas pode inundar grandes áreas de terra, geralmente com destruição de instalações e perda de reservas naturais; os combustíveis fósseis e as usinas nucleares provocam poluição do ar, afetam a segurança e requerem o tratamento do lixo).

A arquitetura nos últimos tempos deve ser concebida, necessariamente, como um elemento que precisa ter eficiência energética. A eficiência energética na arquitetura pode ser entendida como um atributo inerente à edificação, representante de seu potencial em possibilitar conforto térmico, visual e acústico aos usuários com baixo consumo de energia (LAMBERT; DUTRA; PEREIRA, 2014).

O desempenho energético de um edifício é resultado de determinações projetuais, principalmente as tomadas nas fases iniciais de concepção do projeto, tais como a volumetria, orientação das fachadas, o posicionamento e sombreamento das aberturas, os sistemas construtivos, dentre outros (LAMBERTS, GHISI E RAMOS, 2006).

A edificação oferece uma interface entre o ambiente externo, sensível às alterações climáticas, e o ambiente interno, que precisa oferecer conforto e segurança aos usuários. Desta forma, adquire fundamental importância a investigação do desempenho de edificações quanto às demandas energéticas futuras, particularmente durante o ciclo de vida planejado para cada edifício (CASAGRANDE, 2013).

Adequar a arquitetura ao clima local visando o conforto ambiental e a eficiência energética foi um dos conceitos que deu início ao que hoje se caracteriza pela denominação de “arquitetura bioclimática” (CORBELLÁ; YANNAS, 2003 *apud* CASAGRANDE, 2013).

O microclima que envolve uma edificação é fator preponderante no consumo de energia, pois estabelece interação entre o edifício e o ambiente natural em que está

inserido (YANG *et al.*, 2012 *apud* MAIOLI, 2014). A orientação da edificação também tem grande influência no consumo energético médio de um ambiente, e tal constatação é encontrada na pesquisa de Santos (2012), onde a mudança da orientação aumentou o consumo final em cerca de 20% dos modelos simulados (MAIOLI, 2014).

Uma das estratégias que podem ser adotadas para minimizar o aumento da demanda de energia e amenizar os prejuízos decorrentes da sua geração é a utilização eficiente dos recursos, ou eficiência energética, que é a obtenção de um mesmo serviço com reduzido consumo de energia (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Para Romero e Phillipi (2000) *apud* Santos (2009), 25% da energia elétrica do setor de edifícios podem ser conservadas com a implantação de regulamentos energéticos. O consumo energético pelas edificações é uma oportunidade para a redução do desperdício de energia, pois a adoção de tecnologias construtivas apropriada pode reduzir o consumo de eletricidade.

Das aplicações de medidas de eficiência no gasto de energia na construção civil surgiram os edifícios “eficientes”. O termo indica um edifício que, quando comparado a outro, oferece as mesmas condições ambientais necessárias ao seu uso, porém com o gasto de energia inferior (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

As primeiras etapas do desenvolvimento de uma política de melhoria nos níveis de eficiência energética no país através de normalização surgiram como consequência da crise de energia de 2001. Nesta ocasião, o Governo Federal publicou a Lei nº 10.295 (BRASIL, 2001b), que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e afirma que cabe ao Poder Executivo desenvolver mecanismos que incentivem a eficiência energética nas edificações no país. O Decreto nº 4059 (BRASIL, 2001a), regulamentou a referida Lei, determinando que:

“[...] os níveis máximos de consumo de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no país, bem como as edificações construídas, serão estabelecidos com base em indicadores técnicos e regulamentação específica” (FOSSATI; LAMBERT, 2010; p. 59).

Conforme Fossati e Lambert (2010, p. 60) em se tratando das edificações, o decreto estabelece as seguintes propostas:

- A adoção de procedimentos para avaliação da eficiência energética das edificações;
- Indicadores técnicos referenciais do consumo de energia das edificações para certificação de sua conformidade em relação à eficiência energética;
- Requisitos técnicos para que os projetos de edificações a serem construídas no país atendam aos indicadores mencionados no item anterior.

No Brasil, duas importantes normas foram criadas com foco na avaliação de questões relacionadas ao desempenho térmico e à eficiência energética de edificações: em 2005 a NBR 15220 – Desempenho Térmico de Edificações (ABNT, 2005a); e em 2009 o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C).

A NBR 15575 – Edificações Habitacionais – Desempenho surge em 2008 com validade a partir de 2013, e com foco “nos requisitos dos usuários para o edifício habitacional e seus sistemas, quanto ao seu comportamento em uso e não na prescrição de como os sistemas são construídos” (ABNT, 2013a, p. xi). A norma possui seis partes, onde o desempenho térmico da habitação é tratado nas partes 1, 4 e 5: *Requisitos Gerais*, *Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE* e *Requisitos para os sistemas de coberturas*, respectivamente.

2.1.2. Regulamento técnico da qualidade do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos – RTQ-C

Em 1985, o governo brasileiro criou o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL que foi uma medida que buscava incentivar o uso da energia elétrica de forma eficiente, tendo como foco principal os equipamentos eletroeletrônicos residenciais e comerciais.

Em 2001, o Brasil passou pela maior crise de fornecimento de energia elétrica da sua história, afetou praticamente todo o território nacional em decorrência de uma oferta menor que a demanda, principalmente industrial, resultado da falta de investimentos no setor energético brasileiro, associado à longa estiagem no mesmo

período (Santos 2012). Neste mesmo ano foi lançada a Lei nº 10.295 que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, regulamentada pelo Decreto nº 4059 de 19 de dezembro de 2001 (BRASIL, 2001a).

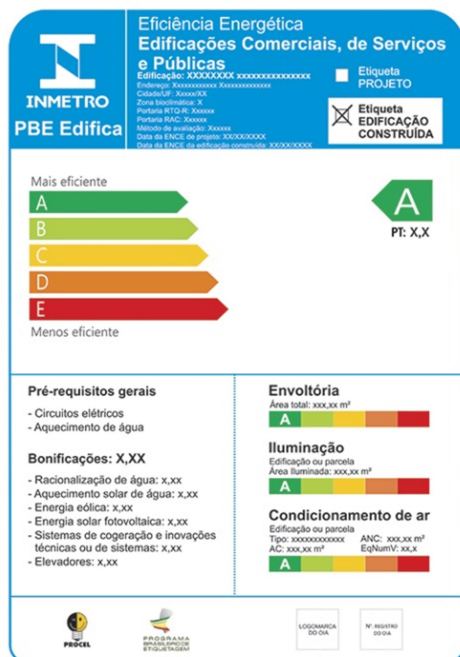
Buscando tornar eficiente o consumo energético, foi criado, em 2004, o Comitê Gestor de Indicadores de Nível de Eficiência Energética que iniciou as discussões para a criação do PROCEL Edifica, exclusivo para edificações e em junho de 2009 foi aprovada pela Portaria nº 163 do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO, a criação do “Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C” (BRASIL, 2009).

O processo de certificação energética de edifícios é adotado por diversos países. Em Portugal, o *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios* (RCCTE) e o *Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios* (RSECE) indicam os níveis de desempenho de edifícios e edifícios climatizados respectivamente. A Austrália possui o *Building Code of Australia* (ABCB) que avalia os parâmetros das edificações diferenciando-os por região ou cidade. Nos EUA, as normas de eficiência são difundidas e usadas há vários anos, sendo a principal, com foco em eficiência da edificação, a Norma 90.1 - *Energy Standard for Buildings Except low-rise Residential Buildings* da ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (2016), norma que detalha os requisitos mínimos de eficiência energética para o projeto e construção de novos edifícios. O Brasil compõe o grupo desses países através da participação do INMETRO e do Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE (CARLO; LAMBERT, 2010a).

O RTQ-C objetiva a etiquetagem de eficiência energética dos edifícios, especifica requisitos técnicos e métodos de classificação dos edifícios comerciais, de serviços e públicos. O consumo energético das edificações está atrelado às perdas e ganhos de calor pela envoltória do edifício, que, juntos à carga interna originada pela ocupação, o uso de equipamentos e iluminação artificial, demandam consumo de condicionamento de ar (CARLO, 2008).

Como os edifícios comercializados nem sempre contemplam a instalação dos equipamentos dos sistemas de ar condicionado e de iluminação, partes dos edifícios podem ser avaliadas, obtendo classificação parcial do nível de eficiência de cada item presente. A figura 1 é a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) para o edifício completo, já a figura 2, o modelo de ENCE parcial para um edifício que somente a envoltória foi etiquetada. (CARLO; LAMBERT, 2010a).

Figura 1: ENCE completo



Fonte: www.procelinfo.com.br 2016

Figura 2: ENCE parcial envoltória



Fonte: www.procelinfo.com.br 2016

Conforme explicitado no RTQ-C:

Parcelas de edificações (pavimento(s) ou conjunto de ambientes) podem também ter o sistema de iluminação e o sistema de condicionamento de ar avaliados. Nestes casos, para a classificação da envoltória, o nível de eficiência energética deve ser estabelecido para a edificação completa. Para a classificação da iluminação e condicionamento de ar, as parcelas devem ser as iguais para que possam fazer parte da mesma ENCE. (RTQ-C 2013, p. 15)

A proposta inicial era da adesão voluntária, no entanto, desde 2014 tornou-se obrigatória em edifícios da Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional. A Instrução Normativa n.º 2/2014 da Secretaria de Logística e Tecnologia da Informação (SLTI), do Ministério de Planejamento Orçamento e Gestão (MPOG), apresenta regras para a aquisição ou locação de máquinas e aparelhos consumidores de energia e o uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) nos projetos e edificações públicas federais novas ou que

recebam retrofit (BRASIL, 2014). A ENCE é concedida na etapa de projeto e após a edificação construída. No primeiro caso é válido até a conclusão da obra, no segundo, o edifício deve ser avaliado com a inspeção in loco.

O procedimento para etiquetagem advém de formato distinto para edifícios comerciais, de serviços e públicos e para edifícios residenciais. Em 2009 foi publicada a metodologia para a classificação do nível de eficiência energética do primeiro grupo, foi revisada em 2010 e recebeu alterações em 2012 e 2013 através de portarias. Em 2010 foi publicada a metodologia para classificação dos edifícios residenciais. (PROCEL INFO, acessado em dezembro 2016).

O Quadro 1 apresenta os documentos do PROCEL Edifica vigentes relacionados às edificações comerciais, de serviços e públicas.

Quadro 1: Documento PROCEL Edifica vigentes

Documentos	Ano
Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C)	2013
Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações Residencial, Comercial, de Serviço e Público (RAC)	2013
Manual para Aplicação do RAC – v. 1	2013
Diretrizes para Obtenção de Classificação Nível A para Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas	2014
Manual para Aplicação do RTQ-C – v. 4	2016

Fonte: Elaborado pelo autor

O RTQ-C disponibiliza duas metodologias de avaliação dos edifícios: o método prescritivo e o método de simulação computacional, este último compara o desempenho do edifício sugerido a obter a etiquetagem (real) com um edifício equivalente (referência), com características de acordo com o nível de eficiência pretendido. A classificação das edificações é feita em cinco níveis: A (mais eficiente), B, C, D e E (menos eficiente).

Sistemas internacionais de avaliação da sustentabilidade de edifícios comumente utilizados no Brasil, tais como o americano *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) e o Alta Qualidade Ambiental (AQUA) – adaptação brasileira para o francês *Haute Qualité Environnementale* (HQE) –, utilizam as diretrizes do PROCEL Edifica nos quesitos “Energia e Atmosfera” e “Gestão de Energia”, respectivamente.

2.1.2.1. Método Prescritivo.

O método prescritivo consiste em um conjunto de parâmetros pré-definidos ou a calcular, que indicam a eficiência do sistema. Este método é estabelecido com regras para identificar a eficiência da edificação e aplica-se à grande maioria das tipologias arquitetônicas existentes no país. Contudo, não compreende todas as soluções possíveis para uma edificação, que em muitos casos só poderão ser avaliados pelo método de simulação (CARLO; LAMBERT, 2010a).

A equação geral de classificação da eficiência, Equação 2.1 do RTQ-C (equação 1), é aplicável ao método prescritivo. Apresenta pesos de 30% para envoltória, 30% para o sistema de iluminação e 40% para condicionamento de ar, que são aplicados em equivalentes numéricos (EqNum) da eficiência de cada sistema: EqNumEnv para envoltória, EqNumCA para condicionamento de ar e EqNumDPI para o sistema de iluminação (CARLO; LAMBERT, 2010a, p. 10).

Equação 1

$$PT = 0,30 \cdot \left\{ \left(EqNumEnv \cdot \frac{AC}{AU} \right) + \left(\frac{APT}{AU} \cdot 5 + \frac{ANC}{AU} \cdot EqNumV \right) \right\} + 0,30 \cdot (EqNumDPI) \\ + 0,40 \cdot \left\{ \left(EqNumCA \cdot \frac{AC}{AU} \right) + \left(\frac{APT}{AU} \cdot 5 + \frac{ANC}{AU} \cdot EqNumV \right) \right\} + b_0^1$$

Onde:

- PT é a pontuação final que irá indicar o nível de eficiência do edifício;
- EqNumEnv é o equivalente numérico da envoltória;
- EqNumDPI é o equivalente numérico do sistema de iluminação, identificado pela sigla DPI, de densidade de potência de iluminação;
- EqNumCA é o equivalente numérico do sistema de condicionamento de ar;
- EqNumV é o equivalente numérico de ambientes não condicionados e/ou ventilados naturalmente;
- APT é a área de piso dos ambientes de permanência transitória, desde que não condicionados;
- ANC é a área de piso dos ambientes não condicionados de permanência prolongada;

- AC é a área de piso dos ambientes condicionados;
- AU é a área útil;
- b é a pontuação obtida pelas bonificações, que varia de 0 a 1.

A ventilação natural é um parâmetro de correção do nível de eficiência energética em edifícios com condições adequadas de conforto sem a necessidade de condicionamento artificial. Ela está presente nas parcelas de condicionamento de ar e da envoltória sob a forma de um equivalente numérico (EqNumV), no entanto, só é obtido através de simulação. Já a bonificação alcança no máximo 1 ponto adicional ao nível de eficiência do edifício, que será obtido através de economias de água ou eletricidade comprovadas por cálculo ou simulação (CARLO; LAMBERT, 2010a, p. 12).

O número de pontos obtidos na Equação 1 irá definir a classificação geral da edificação, de acordo com a Tabela 2.3 do Manual do RTQ-C visualizada na tabela 1. As classificações final e parciais são apresentadas na ENCE.

Tabela 1: Classificação geral da edificação RTQ-C

Pontuação	Classificação Final
$\geq 4,5$ a 5	A
$\geq 3,5$ a $< 4,5$	B
$\geq 2,5$ a $< 3,5$	C
$\geq 1,5$ a $< 2,5$	D
$< 1,5$	E

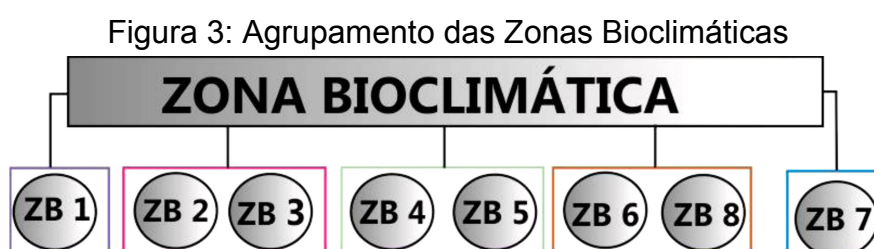
Fonte: PROCEL 2016, p. 68, adaptado pelo autor

Outros dois parâmetros importantes que precisam ser atendidos para que a edificação se enquadre nas classificações de A até E, são as transmitâncias da cobertura e das paredes, componentes da envoltória. Esses valores necessários serão apresentados na descrição do procedimento do Método Prescritivo para Envoltória.

2.1.2.2. Método prescritivo para a envoltória

O Zoneamento Bioclimático¹ brasileiro é estabelecido pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005c) e sua determinação é necessária para definir quais equações do RTQ-C serão utilizadas para o cálculo da eficiência da envoltória. A NBR 15220-2 (ABNT 2005b) estipula os métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica e os componentes de edificações. Tais informações são complementares para a definição da classificação final da envoltória. O RTQ-C estipula duas equações por Zona Bioclimática: uma para edifícios com área de projeção (A_{pe}) $\leq 500 \text{ m}^2$ e outra para edifícios com área de projeção (A_{pe}) $> 500 \text{ m}^2$.

No desenvolvimento das equações do indicador de consumo, algumas Zonas Bioclimáticas foram agrupadas, sendo representadas pela mesma equação, pois as simulações não mostraram diferenças significativas entre os consumos de energia de edificações simuladas nas referidas zonas, conforme figura 3.



Fonte: PROCEL 2016, p. 110

As equações com $A_{pe} > 500 \text{ m}^2$ são válidas para um Fator de Forma mínimo permitido (A_{env}/V_{tot}). As equações para $A_{pe} \leq 500 \text{ m}^2$ são válidas para um Fator de Forma máximo permitido (A_{env}/V_{tot}). Acima ou abaixo desses, deve-se utilizar os valores limites.

O indicador de consumo da envoltória (IC_{env}) é definido por meio das equações presentes no RTQ-C. Um dos edifícios objetos deste estudo está localizado na Zona Bioclimática 8 (Vitória), cuja equação para cálculo do IC_{env} para área de projeção $A_{pe} \leq 500 \text{ m}^2$ é apresentada na equação 2, e para áreas de projeção $A_{pe} > 500 \text{ m}^2$, na equação 3.

¹ Em 2012 o pesquisador Mauricio Roriz apresentou uma proposta de revisão do Zoneamento Bioclimático brasileiro elevando para 16 o número de zonas. Roriz, M. Segunda proposta de revisão do zoneamento bioclimático do Brasil, São Carlos, SP. Agosto de 2012. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Zoneamento.pdf>.

$A_{pe} \leq 500 \text{ m}^2$

Limite: Fator de forma máximo (A_{env}/V_{tot}) = 0,48

Equação 2:

$$IC_{env} = 454,47.FA - 1641,37.FF + 33,47.PAF_T + 7,06.FS + 0,31.AVS - 0,29.AHS - 1,27.PAF_T.AVS + 0,33.PAF_T.AHS + 718$$

$A_{pe} > 500 \text{ m}^2$

Limite: Fator de forma mínimo (A_{env}/V_{tot}) = 0,17

Equação 3:

$$IC_{env} = -160,36.FA + 1277,29.FF - 19,21.PAF_T + 2,95.FS - 0,36.AVS - 0,16.AHS + 290,25.FF.PAF_T + 0,01.PAF_T.AVS.AHS - 120,58$$

Onde as variáveis das Equações são:

- IC_{env} : Indicador de Consumo da envoltória (adimensional);
- A_{pe} : Área de projeção do edifício; (m^2);
- A_{tot} : Área total construída (m^2);
- A_{env} : Área da envoltória (m^2);
- A_{pcob} : Área de projeção da cobertura (m^2);
- AVS : Ângulo Vertical de Sombreamento², entre 0 e 45 (graus);
- AHS : Ângulo Horizontal de Sombreamento³, entre 0 e 45 (graus);
- FF : Fator de Forma, (A_{env}/V_{tot});
- FA : Fator Altura, (A_{pcob}/A_{tot});
- FS : Fator Solar;
- PAF_T : Percentual de Abertura na Fachada total (adimensional, para uso na equação);
- V_{tot} : Volume total da edificação (m^3).

² Os AVS são referentes à existência de proteções solares horizontais nas aberturas.

³ Os AHS são referentes à existência de proteções solares verticais nas aberturas.

Para que a edificação seja classificada as fórmulas são utilizadas para o cálculo de três indicadores de consumo:

- IC_{env} : indicador de consumo de envoltória do edifício em avaliação;
- IC_{min} : indicador de consumo mínimo, utiliza parâmetros de entrada fornecidos pelo RTQ-C, e que são consideradas de uma envoltória eficiente (tabela 2); e
- IC_{maxD} : indicador de consumo máximo da volumetria, utiliza parâmetros de entrada fornecidos pelo RTQ-C e representa o indicador máximo que a edificação deve atingir para obter a classificação D, acima deste valor, a edificação passa a ser classificada com o nível E (tabela 3).

Tabela 2: Parâmetros do IC_{min}

PAF _T	FS	AVS	AHS
0,05	0,87	0	0

Fonte: PROCEL 2016, p. 109

Tabela 3: Parâmetros do IC_{maxD}

PAF _T	FS	AVS	AHS
0,60	0,61	0	0

Fonte: PROCEL 2016, p. 108

Todos os três indicadores acima apresentam o mesmo Fator de Forma (FF) e Fator Altura (FA). IC_{min} e IC_{maxD} representam o intervalo dentro do qual a edificação proposta deve se inserir. O intervalo é dividido em quatro partes (i), equação 4, a fim de identificar os limites do IC que definem os níveis de eficiência energética para aquela volumetria.

Equação 4:

$$i = \frac{(IC_{maxD} - IC_{min})}{4}$$

Em seguida, deve-se verificar onde o IC_{env} está localizado nesses intervalos, tabela 4, o nível de eficiência da envoltória é dado pela localização do IC da envoltória.

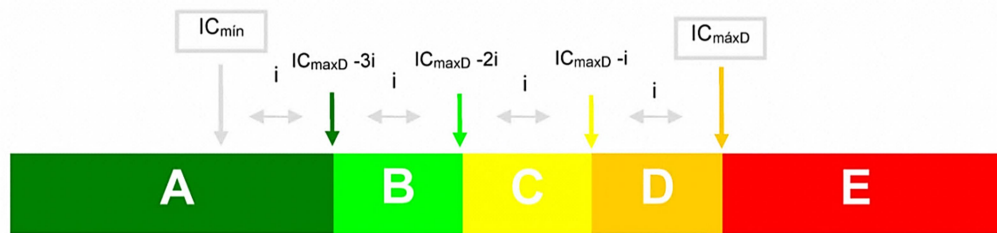
Tabela 4: Limites dos intervalos dos níveis de eficiência

Eficiência	A	B	C	D	E
Lim. Min.	-	$IC_{maxD} - 3i + 0,01$	$IC_{maxD} - 2i + 0,01$	$IC_{maxD} - i + 0,01$	$IC_{maxD} + 0,01$
Lim. Máx.	$IC_{maxD} - 3i$	$IC_{maxD} - 2i$	$IC_{maxD} - i$	IC_{maxD}	-

Fonte: PROCEL 2016, p. 109

A figura 4 apresenta o intervalo (i) na escala de Indicadores de Consumo do ENCE.

Figura 4: Ilustração do cálculo de IC



Fonte: PROCEL 2016, p. 115

Para a classificação final da envoltória, propriedades importantes precisam ser calculadas para as paredes e cobertura, que são: resistência térmica, transmitância térmica e capacidade térmica. Para defini-los o RTQ-C utiliza a metodologia de cálculo da NBR 15220-2 para componentes com camadas homogêneas e não homogêneas, sendo as equações apresentadas no quadro 2.

Quadro 2: Equações para cálculo das propriedades térmicas da envoltória

Propriedade	Equação
Resistência Térmica (R)	$R_{comp} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n}{\left(\frac{A_1}{R_1}\right) + \left(\frac{A_2}{R_2}\right) + \left(\frac{A_3}{R_3}\right) + \dots + \left(\frac{A_n}{R_n}\right)}$
Transmitância Térmica (U)	$U = 1/R_{comp}$
Capacidade Térmica (C _T)	$R_{comp} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n}{\left(\frac{A_1}{C_{T1}}\right) + \left(\frac{A_2}{C_{T2}}\right) + \left(\frac{A_3}{C_{T3}}\right) + \dots + \left(\frac{A_n}{C_{Tn}}\right)}$

Fonte: ABNT 2005b, adaptado pelo autor

As tabelas 5 e 6 apresentam os valores para a transmitância térmica dos componentes da envoltória de acordo com o zoneamento bioclimático da região que está inserida a edificação.

Tabela 5: Transmitância térmica de cobertura (U_{COB}) para os diferentes níveis de eficiência e Zonas Bioclimáticas

Zonas Bioclimáticas	U _{COB} A (W/m²K)		U _{COB} B (W/m²K)		U _{COB} C e D (W/m²K)	
	Ambientes condicionados		Ambientes condicionados		Ambientes condicionados	
	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
ZB 1 e 2	0,5	1,0	1,0	1,5	2,0	
ZB 3 a 8	1,0	2,0	1,5	2,0		

Fonte: PROCEL, 2016, p. 93, adaptado pelo autor.

Tabela 6: Transmitância térmica das paredes (U_{PAR}) para os diferentes níveis de eficiência e Zonas Bioclimáticas

Zonas Bioclimáticas	U_{PAR} A (W/m ² K)	U_{PAR} B (W/m ² K)	U_{PAR} C e D (W/m ² K)
ZB 1 e 2	1,0	2,0	3,7
ZB 3 a 6	3,7		
ZB 7 e 8	2,5W/m ² K, para CT < 80 kJ/m ² K		
	3,7 W/m ² K, para CT > 80 kJ/m ² K		

Fonte: PROCEL, 2016, p. 94

Buscando melhor entendimento das equações para o cálculo do IC_{env} , o quadro 3 apresenta as definições adotadas pelo RTQ-C (2013).

Quadro 3: Definições das variáveis da equação de cálculo IC_{env}

Variáveis	Definições
Área de Projeção da Edificação (A_{pe}) (m^2)	É a área de projeção da cobertura em edifícios de formato regular, em edifícios de formato irregular é a média da projeção dos pavimentos, excluindo o subsolo.
Área Total Construída (A_{tot}) (m^2)	Considera-se a área de piso de todos os pavimentos incluso a espessura do fechamento externo.
Área da Envoltória (A_{env}) (m^2)	Soma das áreas das fachadas, empenas e cobertura, incluindo as aberturas.
Área de Projeção da Cobertura (A_{pcob}) (m^2)	Área da projeção horizontal da cobertura, incluindo terraços cobertos ou descobertos e excluindo beirais, marquises e coberturas sobre varandas – esta última, desde que fora do alinhamento do edifício.
Ângulo Horizontal de Sombreamento (AHS)	Ângulo formado entre dois planos verticais
Ângulo Vertical de Sombreamento (AVS)	Ângulo formado entre dois planos que contêm a base da abertura
Fator de Forma (FF)	Razão entre a área da envoltória e o volume total da edificação (A_{env}/V_{tot}).
Fator Altura (FA)	Razão entre a área de projeção da cobertura e a área total construída (A_{pcob}/A_{tot}), com exceção dos subsolos.
Percentual de Área de Abertura na Fachada Total (PAF_T) (%)	PAF_T é um índice que representa a dimensão das aberturas e resulta em valor numérico que posteriormente será usado no cálculo do IC_{env} . Refere-se às partes com materiais transparentes ou translúcidos e é calculado pela razão entre a soma das áreas de abertura envidraçada, ou com fechamento transparente ou translúcido, de cada fachada e a área total de fachada da edificação.
Volume Total da Edificação (V_{tot}) (m^3)	Volume delimitado pelos fechamentos externos do edifício (fachadas e cobertura), com exceção de pátios internos descobertos.
Fator Solar (FS)	Razão entre o ganho de calor que entra num ambiente através de uma abertura e a radiação solar incidente nesta mesma abertura. Inclui o calor radiante transmitido pelo vidro e a radiação solar absorvida, que é re-irradiada ou transmitida, por condução ou convecção, ao ambiente. O fator solar considerado será relativo a uma incidência de radiação solar ortogonal à abertura.
Transmitância Térmica ($W/(m^2K)$)	É a Transmissão de calor em unidade de tempo e através de uma área unitária de um elemento ou componente construtivo, neste caso, de componentes opacos das fachadas (paredes externas) ou coberturas, incluindo as resistências superficiais interna e externa, induzida pela diferença de temperatura entre dois ambientes. A transmitância térmica deve ser calculada utilizando o método de cálculo da NBR 15220 - Parte 2 ou determinada pelo método da caixa quente protegida da NBR 6488.
Absortância Térmica	Segundo NBR 15220-1 (2005) a Absortância à radiação solar (α) e o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície. Absortância solar é uma propriedade do material referente à parcela da radiação absorvida pelo mesmo, geralmente relacionada à cor. Quanto maior a absortância, maior a parcela da energia incidente que se transforma em calor (radiação de ondas longas) após incidir sobre um material opaco.

Fonte: Adaptado do PROCEL 2016

2.1.2.3. Método Simulação

O RTQ-C (BRASIL, 2013) incluiu simulação como um de seus métodos de avaliação para a obtenção da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE).

A simulação energética lida com interações complexas sob uma diversidade de condições, aproximando-se das interações reais mais complexas ainda pertencentes aos edifícios (GONÇALVES e ALMEIDA, 1995 *apud* CARLO e LAMBERT, 2010b). Assim, embora se aproxime da realidade do edifício, ainda lida com simplificações da realidade, representada nos modelos (CARLO; LAMBERT, 2010b, p. 28).

O RTQ-C propôs a avaliação por um método que permite a análise comparativa da eficiência usando dois modelos de edifícios com características semelhantes, contudo, não dispensa a necessidade de que alguns parâmetros referenciais sejam pré-definidos, a fim de viabilizar a avaliação. Os parâmetros referenciais são originados no método prescritivo, e conforme o Manual do RTQ-C (2013, p. 175), “o processo de certificação realizado através da simulação não descarta o método prescritivo. Ele é utilizado para comprovar que, em casos específicos, a utilização de parâmetros diferentes que os determinados no RTQ-C geram uma maior economia de energia, garantindo o conforto do ambiente”.

Demais parâmetros pré-definidos referem-se ao programa de simulação, o arquivo climático utilizado e ao método de simulação.

Para o programa de simulação, o Manual do RTQ-C (2016, p. 180) exige algumas características:

- Ser validado pela ASHRAE Standard 140⁴;
- Modelar 8760 horas por ano;
- Modelar variações horárias de ocupação, potência de iluminação e equipamentos e sistemas de ar condicionado, definidos separadamente para cada dia da semana e feriados;
- Permitir a modelagem de multizonas térmicas;
- Deve ter capacidade de simular estratégias bioclimáticas propostas no projeto;

⁴ ANSI/ASHRAE Standard 140 - Método Padrão de Teste para Avaliação de Programas de Computador para Análise de Energia da Construção. (www.ashrae.org, acesso em 12 dez 2016)

- Determinar a capacidade solicitada pelo Sistema de Condicionamento de Ar;
- Produzir relatórios horários do uso final de energia.

Em relação ao arquivo climático a ser utilizado, o Manual RTQ-C (2016, p. 181) estipula que:

- Deve fornecer valores para todos os parâmetros relevantes requeridos pelo programa de simulação, tais como temperatura e umidade, direção e velocidade do vento e radiação solar;
- Os dados climáticos devem ser representativos da Zona Bioclimática onde o projeto proposto será locado e, caso o local do projeto não possuir arquivo climático, deve-se utilizar dados climáticos de uma região próxima que possua características climáticas semelhantes;
- Devem ser utilizados arquivos climáticos e formatos publicados no www.eere.energy.gov (TRY, TMY, SWEC, CTZ2...). Caso contrário o arquivo climático deve ser aprovado pelo laboratório de referência.

O Manual RTQ-C (2016, p. 181) determina que o método de simulação:

[..] compara o desempenho do edifício proposto (real) com um edifício similar (de referência), cujas características devem estar de acordo com o nível de eficiência pretendido. Portanto, dois modelos devem ser construídos: o modelo representando o edifício real (de acordo com o projeto proposto) e o modelo de referência (de acordo com o nível de eficiência pretendido).

No RTQ-C a simulação é o método mais completo para análise do desempenho térmico e/ou energético do edifício, pois proporciona flexibilidade de opções que buscam a racionalização do consumo de energia, o que inclui o processo de projetar. A simulação permite o estudo nos casos de edificações com volumetrias, aberturas ou proteções solares mais complexas. Permite também ao projetista propor soluções no projeto de condicionamento de ar que poderão alcançar elevados níveis de eficiência. Por fim, permite a avaliação das condições passivas de condicionamento, como estratégias de ventilação natural ou forçada e inércia térmica para aquecimento ou resfriamento (CARLO e LAMBERT 2010b).

2.1.2.4. Método simulação para envoltória

Para a obtenção de Etiqueta Parcial de Envoltória deve-se simular com os sistemas de iluminação e de condicionamento de ar especificados para o modelo de referência conforme o nível de eficiência pretendido. Para o sistema de iluminação

deve-se definir um uso de adotar valores de densidade de potência de iluminação limite (DPIL), segundo tabela 7.

Tabela 7: Relação entre áreas de ambientes e áreas de controle independente

Área total de piso do ambiente	Área máxima de piso da parcela iluminada por sistema com um controle independente
$\leq 1000 \text{ m}^2$	250 m^2
$>1000 \text{ m}^2$	1000 m^2

Fonte: PROCEL 2016, p. 125

Para situações de ambientes com área inferior a 250 m^2 , é permitido um controle para todo o ambiente. No caso de ambientes com áreas acima de 250 m^2 , é determinada a divisão do sistema de iluminação em parcelas menores, com no máximo 250 m^2 , cada uma com controle independente de acionamento. Desta forma quando houver poucos usuários no local somente será iluminada a área ocupada. Se o ambiente apresenta área maior que 1000 m^2 o sistema de iluminação deve ser dividido em parcelas com áreas máximas de 1000 m^2 .

Os edifícios condicionados artificialmente podem ser submetidos à classificação do nível de eficiência, através da simulação, tanto para a etiqueta geral quanto para as etiquetas parciais. Para tanto, o modelo real deve ser desenvolvido de acordo com a etiqueta desejada, geral ou parcial. Quando necessário, o sistema de condicionamento de ar deve-se atender às tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 do Manual RTQ-C (2016). Contudo, os modelos propostos para as simulações desta pesquisa possuem sistema próprio de condicionamento de ar.

2.1.3. ASHRAE Handbook – Fundamentals

O uso de normas elaboradas pela ASHRAE faz-se necessária não somente para atender às exigências mínimas impostas pelo Manual do RTQ-C na escolha dos programas para o método de simulação, pois, estes mesmos programas são configurados seguindo a metodologia de cálculo para a Transmitância Térmica (U) da envoltória encontrada na ASHRAE *Handbook – Fundamentals*.

A *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) teve origem em 1954 com a fusão entre a *American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers* (ASHAE), fundada em 1894, e a *American Society of*

Refrigerating Engineers (ASRE), fundada em 1904. A ASHRAE é uma sociedade global que busca promover o bem estar das pessoas através de tecnologia sustentável para o ambiente construído. A sua atuação se concentra nos sistemas construtivos, eficiência energética, refrigeração, qualidade de ar interno e sustentabilidade das edificações.

O Manual ASHRAE – Fundamentos de 2013 (*ASHRAE Handbook—Fundamentals*) abrange os princípios básicos e os dados utilizados na indústria AVAC & R – Aquecimento, Ventilação, Ar Condicionado & Refrigeração (HVAC & R – *Heating, Ventilating, Air Conditioning and Refrigeration*). O Manual possui 31 capítulos divididos em 7 temas, e os capítulos acerca do tema da envoltória da edificação são:

- Capítulo 25: Controle de Calor, Ar e Umidade na Construção do Edifício – Fundamentos;
- Capítulo 26: Controle de Calor, Ar e Umidade na Construção do Edifício – Propriedades dos Materiais;
- Capítulo 27: Controle de Calor, Ar e Umidade na Construção do Edifício – Exemplos.

O capítulo 25 discute os fundamentos da transferência combinada de calor, ar e umidade em relação à envoltória do edifício. Como todos estão ligados e interagem de perto, não devem ser tratados separadamente. A transferência de calor através da envoltória da edificação está principalmente associada ao desempenho energético do edifício. Outros fatores também são importantes, como a temperatura da superfície interna, necessária para o conforto térmico; os picos de temperatura no interior ou nas superfícies que podem afetar a resistência da envoltória e a variação da temperatura que pode causar degradação, deformação e até falhas mecânicas dos materiais utilizados.

O capítulo 26 contempla os dados de propriedade dos materiais relacionados ao desempenho térmico, de ar e de umidade utilizados na construção da edificação. As informações podem ser usadas em método de cálculos simplificados ou em métodos de simulações em programas para soluções transitórias.

São fornecidas as propriedades térmicas para uma variedade de materiais de construção, materiais isolantes e sistemas isolantes, como: a condutividade térmica; a resistência térmica; a capacidade térmica específica e a emissividade. Também estão disponíveis os dados sobre as resistências da cavidade do ar e os coeficientes do filme de superfície, pois, também são fatores importantes no desempenho da edificação.

Os materiais definidos para os modelos das edificações, assim como as suas propriedades, atenderão à NBR 15220/2005

No capítulo 27 há a demonstração da aplicação dos métodos de cálculos para a envoltória da edificação utilizando as informações provenientes dos capítulos 25 e 26. São descritas as metodologias de cálculo para as paredes e cobertura que compõem a envoltória das edificações. A norma apresenta duas possibilidades de determinar a transmitância da envoltória: 1) através do fluxo de calor unidimensional, que é considerado o ponto de partida para determinar a transmissão de calor de toda a edificação; 2) o fluxo bidirecional, quando o conjunto contém materiais diferentes. Este último é dividido entre o método paralelo, método dos planos isotérmicos, método da zona e o método da zona modificada.

A ASHRAE *Handbook*, no seu capítulo 27, descreve tais métodos:

[...] O método paralelo é usado quando a condutividade térmica dos materiais diferentes na camada é bastante próxima do valor (na mesma ordem de grandeza), como as paredes do quadro de madeira. O método dos planos isotérmicos é apropriado para materiais com condutividades moderadamente diferentes das de materiais adjacentes (por exemplo, alvenaria). O método da zona e o método da zona modificada são apropriados para materiais com uma diferença muito alta de condutividade (duas ordens de grandeza ou mais), como, por exemplo, com montagens contendo metal. (ASHRAE, 2013, p. 27.3)

Para o cálculo do fechamento horizontal da envoltória, a cobertura, a norma considera o conjunto como de fluxo de calor unidirecional, que resulta na somatória das resistências (R) dos materiais que compõem a cobertura, equação 5.

Equação 5:

$$R_{cob} = R_e + R_s + R_i$$

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

Onde:

- $R_1 + R_2 + R_3 + R_n$ – Resistência térmica das camadas do sistema ($m^2.K/W$)
- R_e – Resistência térmica do ar externo ($m^2.K/W$)
- R_s – Resistência térmica do sistema ($m^2.K/W$)
- R_i – Resistência térmica do ar interno ($m^2.K/W$)

Para o cálculo fechamento vertical da envoltória é considerado o fluxo de calor bidirecional. Como o conjunto utilizado é alvenaria convencional o método definido é o dos planos isotérmicos. Os valores da resistência alvenaria (R_{alv}) são estipulados assumindo uma combinação de camadas em série, com uma ou mais camadas em paralelos. O valor total é determinado pela equação 6 acrescida da camada de reboco.

Equação 6:

$$R_{T(alv)} = R_e + R_{reb} + R_f + R_{int} + R_{reb} + R_i$$

$$R_{int} = \frac{1}{\frac{A_{est}}{R_{est}} + \frac{A_v}{R_v}}$$

Onde:

- $R_{T(alv)}$ = resistência térmica total da alvenaria ($m^2.K/W$)
- R_{reb} = resistência térmica do reboco ($m^2.K/W$)
- R_i = resistência térmica do filme interno da superfície do ar ($m^2.K/W$)
- R_e = resistência térmica do filme externo da superfície do ar ($m^2.K/W$)
- R_f = resistência térmica total das faces dos blocos ($m^2.K/W$)
- R_{int} = resistência térmica interna do bloco ($m^2.K/W$)
- R_v = resistência térmica dos vazios (núcleos) entre as faces ($m^2.K/W$)

- R_{est} = resistência térmica da estrutura interna dos blocos ($m^2.K/W$)
- A_{est} = área total transversal ao fluxo de calor nas estruturas internas dos blocos
- A_v = área total transversal ao fluxo de calor dos vazios (núcleos) dos blocos

O fator de transmitância (U) da envoltória da edificação determina a taxa de condução de calor em estado estacionário através das paredes e está relacionado à resistência térmica do conjunto, sendo este inversamente proporcional à resistência térmica ($U=1/R$).

A ASHRAE não determina um método de cálculo da capacidade térmica (C_T) para fechamentos verticais em alvenarias convencionais de tijolos ou blocos de concretos e horizontais em concreto das edificações.

2.1.4. NBR 15575 – Edificações habitacionais – Desempenho

A norma NBR 15575 de 2013 foi elaborada com intuito de estabelecer padrões de eficiência às edificações brasileiras. Tendo como foco principal as edificações habitacionais, que atualmente é referência para todo e qualquer tipo de construção, é composta por 06 Partes, sendo que a Primeira Parte “estabelece os requisitos e critérios de desempenho que se aplicam às edificações habitacionais como um todo integrado, bem como serem avaliados de forma isolada para um ou mais sistemas específicos” (ABNT, 2013a, p. 1).

Os quesitos de desempenho térmico da edificação são abordados pelas Partes 4 e 5, Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas e Requisitos para os sistemas de coberturas, respectivamente.

A Parte 4 da norma em relação ao desempenho térmico da edificação, “apresenta os requisitos e critérios para verificação dos níveis mínimos de desempenho térmico de vedações verticais externas, conforme definições, símbolos e unidades das ABNT NBR 15220-1 e ABNT NBR 15220-5” (ABNT 2013b, p. 26).

Após os cálculos, as edificações que obtiverem os valores definidos pela NBR 15220-2 referentes às propriedades transmitância térmica e capacidade térmica para

as vedações verticais externas, serão classificadas como *M*, *I* e *S*, que são *níveis mínimo, intermediário e superior*, respectivamente, de desempenho para aceitação.

A NBR 15575, assim como o RTQ-C, define os valores da transmitância térmica e da capacidade térmica conforme o zoneamento bioclimático, no entanto, divergem dos valores, tabelas 8 e 9.

Tabela 8: Transmitância Térmica paredes externas

Transmitância térmica – U (W/m ² .K)		
Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8	
U ≤ 2,5	α ≤ 0,6	α > 0,6
	U ≤ 3,7	U ≤ 2,5

α = absorvência à radiação solar da superfície externa da parede.

Fonte: ABNT, 2013b, p. 27

Tabela 9: Capacidade Térmica paredes externas

Capacidade térmica – CT (kJ/m ² .K)	
Zona 8	Zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7
Sem requisito	≥ 130

Fonte: ABNT, 2013b, p. 27

A Parte 5, assim como a Parte 4, apresenta os requisitos e critérios para alcançar o nível mínimo de desempenho térmico das edificações, no entanto, o foco são as coberturas, conforme parâmetros estipulados pela NBR 15220-1 e NBR 15220-3. Semelhante às paredes, a NBR 15575 apresenta parâmetros e valores para as coberturas que divergem com o RTQ-C, tabela 10.

Tabela 10: Transmitância Térmica coberturas

Transmitância térmica – U (W/m ² .K)					
Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 6		Zonas 7 e 8		Nível de desempenho
U ≤ 2,3	α ≤ 0,6	α > 0,6	α ≤ 0,4	α > 0,4	M
	U ≤ 2,3	U ≤ 1,5	U ≤ 2,3FV	U ≤ 1,5FV	
U ≤ 1,5	α ≤ 0,6	α > 0,6	α ≤ 0,4	α > 0,4	I
	U ≤ 1,5	U ≤ 1,0	U ≤ 1,5FV	U ≤ 1,0FV	
U ≤ 1,0	α ≤ 0,6	α > 0,6	α ≤ 0,4	α > 0,4	S
	U ≤ 1,0	U ≤ 0,5	U ≤ 1,0FV	U ≤ 0,5FV	

Na zona bioclimática 8 considera-se atendido o critério para coberturas em telhas cerâmicas, mesmo sem a presença de forro.

Nota: O fator de ventilação (FV) é estabelecido na ABNT NBR 15220-3, em função das dimensões das aberturas de ventilação nos beirais, conforme indicações seguintes:

Fonte: ABNT, 2013c, p. 52

Em relação às esquadrias a NBR 15575 – Parte 1, determina uma taxa de ventilação do ambiente de 1 ren/h, assim como para a cobertura, que a taxa de renovação também deve ser a mesma, de 1 ren/h.

Diferentemente da NBR 15220-2 e do PROCEL Edifica, a NBR 15575 não define valor para a capacidade térmica (C_T) das paredes externas de edificações localizadas na Zona Bioclimática 8, não sendo um requisito a ser atendido, e semelhante ao Manual ASHRAE – Fundamentos, que não determina um método de cálculo, e nem valores, para a capacidade térmica dos fechamentos verticais em alvenarias convencionais.

2.1.5. Análise energética por simulação

Estudos recentes indicam que cresce a procura de instalações do edifício sustentável com mínimo impacto ambiental. O aumento dos custos da energia e crescentes preocupações ambientais são os catalisadores para essa alta demanda. Com um acréscimo em torno de 2% no valor da obra para contemplar, ainda na etapa de elaboração do projeto de arquitetura, o quesito eficiência energética da edificação, resulta em uma economia de aproximadamente 20% do custo total da construção. Assim, os edifícios sustentáveis se tornam economicamente viáveis (AZHAR *et al* 2011).

As decisões mais eficazes relacionadas ao desenho sustentável de um edifício são feitas na etapa de projeto, ou mais tardar, na fase inicial de construção. Obviamente, as decisões feitas após estas etapas levam, quase sempre, ao ineficiente e dispendioso processo de retrabalho e alteração do projeto do edifício para conseguir um conjunto de critérios de desempenho (SCHLUETER; THESSELING, 2009).

A análise do consumo de energia dos edifícios é uma tarefa difícil, visto que as mudanças e condições meteorológicas, o comportamento dinâmico do edifício e a presença de múltiplas variáveis em seu funcionamento, requerem a ajuda de simuladores na etapa de projeto das edificações na busca do melhor desempenho no consumo de energia. O uso de simulações por computador requer a entrada considerável de dados detalhados e de tempo, mesmo para usuários experientes (SHOUBI *et al*, 2015).

Projetar edifícios eficientes implica compreender os resultados das simulações de energia, pois, existem diversas soluções para atender as necessidades apresentadas pela análise energética. Ao se concentrar em diferentes aspectos da simulação de desempenho energético, cada ferramenta simula consumos de energia com base nos parâmetros do modelo para auxiliar na finalização do projeto (CHO, CHEN, WOO, 2011).

As simulações de análise de desempenho energético com ferramentas BEM, ainda na fase de projeto, permitem comparar as diferentes alternativas em termos de construção eficiente. A comparação entre os resultados subsidia os arquitetos e engenheiros na tomada de decisão referente à tipologia da edificação, envelope, aberturas, iluminação, etc. (GARCIA; ZHU, 2015).

As aplicações destas ferramentas são muito comuns no que diz respeito à eficiência energética (HAM; GOLPARVAR-FARD, 2015). Essas ferramentas são normalmente utilizadas para avaliar os impactos das diversas alternativas à melhoria do desempenho energético, redução de custos e o desempenho de uma edificação por todo o seu ciclo de vida. Ferramentas de análise normalmente apresentam duas partes:

1. Uma interface gráfica de usuário;
2. Um motor de simulação térmica de cálculos.

Desenvolvidas inicialmente para analisar o ciclo de vida do edifício ainda na fase de projeto, fornecendo dados para tomada de decisões, a evolução dessas ferramentas conduz para uma utilização mais ampla sobre todas as fases da vida de um edifício (MAILE; FISCHER; BAZJANAC, 2007).

Estes programas consideram as características do projeto de construção, tais como isolamento térmico, vidros, sombreamento, ganho solar, penetração solar, vedação de ar, ventilação natural, ventilação mecânica, sistemas AVAC, dinâmica de construção e massa térmica (CHO et al., 2010).

Os mecanismos de simulação destes pacotes funcionam com os princípios termodinâmicos, considerando quaisquer premissas para produzir as cargas

térmicas horárias anuais, tanto em texto como em saída gráfica (MOTAWA, CARTER, 2013).

Um grande número de ferramentas de análise de eficiência da edificação está disponível ao público, o *International Building Performance Simulation Association* – IBPSA, responsável pelo *Building Energy Simulation Tools* – BEST-D, possui um diretório na internet que disponibiliza mais de 80 destas ferramentas. Anteriormente este diretório era hospedado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos – US-DOE. A absorção dessas ferramentas na construção de práticas de projeto não tem atendido às expectativas, e as soluções existentes ainda sofrem limitações (AUGENBROE *et al.* 2001).

Os principais motores de análise de desempenho foram desenvolvidos pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL) junto com o *US-Department of Energy* através do *National Renewable Energy Lab* (NREL): Doe-2 e EnergyPlus. O DOE-2 é "amplamente reconhecido como o padrão da indústria" (U.S. DOE 2007) e o EnergyPlus, seu sucessor, ganhou vários prêmios desde o seu lançamento em 2001 (MAILE; FISCHER; BAZJANAC, 2007). O motor DOE-2 surgiu no início da década de 1980, é um dos motores de simulação térmico mais utilizado atualmente, sendo desenvolvido para estudar o desempenho energético de todo o edifício durante a fase de projeto (BIRDSALL *et al.*, 1990 *apud* MAILE; FISCHER; BAZJANAC, 2007). O EnergyPlus, disponível em 1999/2000, utiliza as melhores características de dois motores de simulação de energia, o DOE-2 e o BLAST, resultando no motor de simulação de nova geração (MAILE; FISCHER; BAZJANAC, 2007).

O DOE-2 não fornece quaisquer dados de importação ou de intercâmbio com outros programas, enquanto o EnergyPlus não possui interface gráfica amigável aos usuários, desta forma, ambos necessitam de outras ferramentas para operação e compartilhamento. Prada-Hernández *et al.* (2015) divide os principais programas BEM em dois grupos, os que utilizam o mecanismo de cálculo desenvolvido pelo *US-Department of Energy* (US-DOE) e os que utilizam motor próprio para cálculo.

As ferramentas de simulação requerem que os usuários atuem diretamente na inserção das informações de uma determinada edificação, tais como geometria,

dados meteorológicos locais, sistemas de climatização, cargas térmicas (iluminação, equipamentos, e ocupantes), e etc.. Estas informações são geralmente obtidas a partir de especificações, desenhos, fotografias ou quaisquer outros dados disponíveis e relevantes. Os parâmetros modelados necessários para a análise são inseridos e o programa de simulação calcula as cargas térmicas da construção e os respectivos consumos de energia (HAM; GOLPARVAR-FARD, 2015).

Normalmente, um modelo BIM de edificação inclui características de forma, tipo de construção, materiais, sistemas de aquecimento e refrigeração, gerenciamento de zona, localização do projeto e dados climáticos, que podem ser exportados para uma ferramenta de simulação. O resultado típico das ferramentas de simulação energética inclui: análise de energia e calor, análise de iluminação e sombreamento, análise acústica e de custo (MOTAWA, CARTER, 2013).

Os benefícios motivaram a *U. S. General Services Administration* (US-GSA)⁵ a adotar o BIM para modelagem e análise de desempenho energético das edificações públicas. A adoção do BIM aumenta a confiabilidade e a consistência dos resultados de simulação de desempenho energético, podendo antecipar informações referentes ao consumo de energia, iluminação natural, conforto ambiental interno e custo do uso e manutenção das edificações e serviços públicos (US-GSA, 2015).

Como o BIM permite a multidisciplinaridade de informações em um modelo, ele cria a oportunidade de realizar a análise de desempenho e adequações da edificação visando ampliar o seu nível sustentável durante todo o processo de sua elaboração.

2.1.6. BIM – Building Information Modeling

A complexidade dos projetos de construção tem crescido a cada ano, o que dificulta a sua gestão. Como resposta ao aumento desta complexidade, surgiu fortemente nos últimos 20 anos a Modelagem de Informações da Construção – BIM (*Building Information Modeling*).

⁵ O GSA é o órgão do Governo Americano que supervisiona a preservação de edifícios históricos e auxilia o governo federal na aquisição de produtos de alta qualidade e serviços de baixo custo a partir de fornecedores comerciais de qualidade (Fonte: www.gsa.gov, acessado em 10 dez 2016).

BIM é, atualmente, a maior denominação para uma nova maneira de abordar o projeto, a construção e a manutenção de edifícios. Ela tem sido definida como "um conjunto de políticas interligadas, processos e tecnologias, que cria uma metodologia para gerenciar o projeto e dados, em formato digital, em todo o ciclo de vida da edificação" (SUCCAR, 2009, p. 357).

A Modelagem de Informação do Edifício (BIM) inclui estruturas e tecnologias de informação e comunicação (TIC) que podem apoiar a colaboração das partes envolvidas durante o ciclo de vida dos projetos, possibilitando inserir, extrair, atualizar ou modificar informações no modelo (MOTAWA, CARTER, 2013).

A tecnologia além de possibilitar a visualização do espaço projetado, permite agregar informações ao modelo para diversas finalidades, possibilitando o aumento de produtividade e racionalização do processo (TSE; WONG, 2005). Desta forma, o BIM apresenta um novo paradigma de gestão da construção civil ou "uma mudança processual da arquitetura, engenharia e construção" (SUCCAR 2009, p.357).

O BIM constitui um projeto e uma simulação de processos integrado e coordenado, que possui todas as informações indispensáveis para elaborar o planejamento e executar um projeto (KYMMELL, 2008 *apud* GARBINI, 2012). A representação destas informações ao longo de toda elaboração do projeto, da construção e do processo de gestão e manutenção, tem sido o objetivo principal buscado pelos que aplicam a tecnologia BIM (EASTMAN 1999 *apud* HOWARD; BJÖRK 2008).

Destaca-se a sua natureza holística, que inclui não apenas o *software* de modelagem geométrica e entrada de informações, mas também o gerenciamento dos projetos relacionados com ferramentas e processos (SUCCAR, 2009 *apud* BRYDE *et al*, 2013). O objetivo principal da gestão de informação é dar suporte à tomada de decisão, garantir que informações precisas estejam disponíveis para a pessoa certa no momento e formato adequados.

A *US. General Services Administration* (2007, p. iii), define BIM como "uma representação digital de características físicas e funcionais do projeto e construção. Sua finalidade é fazer com que as informações do desenho sejam explícitas, de

modo que a intenção do projeto pode ser imediatamente compreendida e automaticamente avaliada”.

O *buildingSMART* (2012) *apud* Checcucci (2014) o define como uma forma de criar um modelo eletrônico para fins de visualização, análise de engenharia, análise de conflitos, critérios de verificação, engenharia de custos, produto como construído, orçamento e muitos outros fins.

Com a tecnologia BIM (Building Information Modeling – Modelagem de Informações da Construção), é possível criar digitalmente um ou mais modelos virtuais precisos de uma construção. Eles oferecem suporte ao projeto ao longo de suas fases, permitindo melhor análise e controle do que os processos manuais. Quando concluídos, esses modelos gerados por computador contêm geometria e dados precisos necessários para o apoio às atividades de construção, fabricação e aquisição por meio das quais a construção é realizada. *Handbook of BIM 2ª Ed.* (EASTMAN et al, 2011, p 1)

O comitê americano *National Institute of Building Sciences* (NIBS, 2007) *apud* Checcucci (2014) categoriza BIM de três maneiras: 1) Um produto, ou representação digital inteligente de dados referente a uma determinada edificação; 2) Uma atividade, processo colaborativo e 3) Um sistema, estrutura de trabalho e comunicação para gerenciar o ciclo de vida da edificação e aumentar a sua qualidade e eficiência.

A *buildingSMART* (2012) *apud* Checcucci (2014, p. 42) utiliza estas mesmas categorizações para definir o BIM:

1. Building Information Modelling ou modelagem da informação da construção, que representa o processo de gerar e utilizar informações sobre a edificação durante todo o seu ciclo de vida, permitindo que os profissionais interessados tenham acesso às mesmas informações simultaneamente, através da interoperabilidade de dados entre diferentes plataformas tecnológicas;
2. Building Information Model, ou o modelo da informação da construção, que representa todas as suas características físicas e funcionais. Como tal, serve como fonte de conhecimento sobre a edificação, formando uma base confiável para auxiliar nas tomadas de decisões durante o seu ciclo de vida;
3. Building Information Management, ou gerenciamento da informação da construção, que trata da organização e do controle do processo empresarial relacionado com a edificação através da utilização da informação do seu modelo digital. Entre seus benefícios podem ser citados: comunicação visual e centralizada; possibilidades de simulações e explorações de opções de projeto; integração de disciplinas; geração de documentação as built, dentre outras.

Conforme explicado por Laiserin (2014) os conceitos, as abordagens e as metodologias que hoje se identificam como BIM têm cerca de quarenta anos, e a terminologia do *Building Information Model* está em circulação há pelo menos quinze anos.

O exemplo mais antigo documentado encontrado por Laiserin (2014) que faz referência ao conceito atualmente conhecido como BIM foi um protótipo de trabalho, o “*Building Description System*”, publicado em 1975 no extinto Jornal AIA por Charles M. “Chuck” Eastman, professor na Universidade de Carnegie-Mellon.

O trabalho de Eastman incluiu noções BIM, agora comuns, como:

(...) definir elementos de forma interativa [...] deriva[ndo] seções, planos isométricos ou perspectivas de uma mesma descrição de elementos [...] Qualquer mudança no arranjo teria que ser feita apenas uma vez para todos os desenhos futuros. Todos os desenhos derivados da mesma disposição de elementos seriam automaticamente consistentes [...] qualquer tipo de análise quantitativa poderia ser ligada diretamente à descrição [...] estimativas de custos ou quantidades de material poderiam ser facilmente geradas [...] fornecendo um único banco de dados integrado para análises visuais e quantitativas [...] verificação de código de edificações automatizado na prefeitura ou no escritório do arquiteto. Empreiteiros de grandes projetos podem achar esta representação vantajosa para a programação e para os pedidos de materiais. (EASTMAN, 1975 apud LAISERIN, 2014, p. v)

No início da década de 1980, o método ou abordagem ficou mais evidente nos Estados Unidos como “*Building Product Models*” (Modelos de Produtos da Construção) e na Europa, mais especificamente na Finlândia, como “*Product Information Models*” (Modelos de Informações do Produto), tornou-se *Building Information Model*, no artigo “*Modelling Multiple Views on Buildings*” de G.A. Van Nederveen e F. Tolman no ano de 1992 (LAISERIN, 2014, p. vi).

Alguns pesquisadores buscam diferenciar os muitos termos disponíveis para o BIM, mas como os limites basicamente se sobrepõem tornam a singularidade de cada termo questionável (SUCCAR, 2009). Estes termos podem ser atribuídos a organizações, pesquisadores, indústria, bem como os desenvolvedores de programas. O quadro 4 apresenta os termos mais utilizados em pesquisa e indústria.

Quadro 4: Termos utilizados relativos a *Building Information Modeling*

Termos usados	Organizações e Pesquisadores
Asset Lifecycle Information System	Fully Integrated & Automated Technology
Building Information Modelling	Autodesk, Bentley Systems and others
Building Product Models	Charles Eastman
BuildingSMART™	International Alliance for Interoperability
Integrated Design Systems	International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB)
Integrated Project Delivery	American Institute of Architects
nD Modelling	University of Salford – School of the Built Environment
Virtual Building™	Graphisoft
Virtual Design and Construction & 4D Product Models	Stanford University – Centre for Integrated Facility Engineering

Fonte: Succar, 2008, p. 359

O BIM tem sido adotado por um número cada vez maior de empresas de Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) para gerenciar informações sobre o projeto e compartilhar informações entre as partes interessadas (GOEDERT; MEADATI, 2008).

As áreas de projetos, planejamento, orçamento e execução (canteiro) se relacionam de forma sequencial, sendo que em um escritório que trabalha com o BIM os processos acontecem simultaneamente. O BIM é uma simulação da realidade e ocorre no ponto de vista físico, de projeto, custo e prazo, acontecendo tudo ao mesmo tempo (COVELO, 2011).

O BIM pode auxiliar nos seguintes aspectos de projeto sustentável (KRIEGEL; NEI, 2008, p. 129):

- Orientação da edificação (selecionar uma boa orientação pode reduzir os custos de energia);
- Tipologia Arquitetônica (analisar a forma e otimizar a construção);
- Captação e reaproveitamento de Água (reduzir as necessidades de água de um prédio);
- Modelagem da energia (reduzir consumo energético e analisar opções de energias renováveis pode contribuir para economia da operação);
- Materiais Sustentáveis (reduzir uso de materiais e optar por materiais reciclados ou reutilizáveis).

A adoção do BIM nos EUA partiu de 17% em 2007 para 71% em 2012, além disso, a Europa adotará o BIM para contratação pública conforme promovido pela Diretoria de Contratos Públicos da União Europeia. Enquanto isso, o BIM é amplamente difundido no Reino Unido e no norte da Europa, pois resulta em menos retrabalho e inclui uma documentação e cronogramas de projeto mais precisos e enxutos (MALTESE et al. 2017).

Eastman *et al* (2014, p. 13), no livro Manual do BIM, o definem como “uma tecnologia de modelagem e um conjunto de processos para produzir, comunicar e analisar modelos de construção”, caracterizados por:

- Componentes de construção (objetos associados a atributos e regras paramétricas);
- Componentes com dados que descrevem o comportamento (quantificação, especificação e análise energética);
- Dados consistentes e não redundantes (dados modificados sempre visíveis);
- Dados coordenados (coordenação das informações do modelo).

Como o BIM ainda não possui uma definição única e amplamente aceita, Campbell (2006, p. T 1.1) define BIM como “*uma simulação inteligente de arquitetura*”. Para o autor a simulação deve possuir seis características principais:

1. Digital;
2. Espacial (3D);
3. Mensurável (quantificável, dimensionável e consultável);
4. Abrangente (incorporando e comunicando a intenção de projeto, o desenho da construção, a construtibilidade e incluir aspectos sequenciais e financeiros de meios e métodos);
5. Acessível (a toda a equipe do empreendimento e ao proprietário por meio de uma interface interoperável e intuitiva);
6. Durável (utilizável ao longo de todas as fases da vida de uma edificação).

Azevedo (2009, p. 6-7), entende que a elaboração de um modelo BIM deve possuir as seguintes características:

- Criação e análise de projeto digital. O modelo é criado inteiramente em computadores;
- Baseado em objetos paramétricos. [...] Objetos paramétricos são aqueles que se ajustam automaticamente a outros objetos num modelo,

tal que, se uma alteração é feita para o modelo que afeta o tamanho, localização ou o afastamento do objeto, ele move-se e ajusta-se de acordo.

- Agrupamento da informação. Para além da representação física de um objeto, os dados funcionais (especificações, garantia, fabricação, outros) associados a esse objeto são incorporados ou vinculados ao objeto BIM e facilmente acessíveis e legíveis.
- Interoperabilidade. [...] a possibilidade de compartilhar abertamente e facilmente as informações em formatos genéricos, sem as restrições do software [...] A capacidade de dois ou mais sistemas ou componentes trocarem informações e usar as informações que foram trocadas.

A aplicação do BIM pode impactar todos os processos dentro da organização do projeto, portanto, não pode ser tratada de forma isolada como uma ferramenta de *software*. Assim, pode ser definido como um processo relacionado, ao invés de simples tecnologia, e que as abordagens requerem o BIM para gerenciar de forma holística (EADIE *et al*, 2013).

O BIM estimula a integração das funções de todas as partes interessadas sobre um projeto. Ele tem o potencial para promover uma maior integração entre todos os envolvidos, resultando em maior eficiência e harmonia na execução do projeto (HEIN *et al*. 2008 *apud* AZHAR 2011).

BIM também suporta o conceito de entrega de projetos integrados (pessoas, sistemas e estruturas e práticas de negócios), um processo colaborativo para reduzir o desperdício (materiais, recursos e custo) e otimizar a eficiência em todas as fases do ciclo de vida do projeto (GLICK; GUGGEMOS, 2009 *apud* AZHAR 2011).

Em 2008 a McGraw-Hill Construction publicou um abrangente relatório de utilização do BIM na indústria de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) com base no questionário respondido por 82 arquitetos, 101 engenheiros, 80 empreiteiros e 39 proprietários (total da amostra: 302 entrevistados) nos Estados Unidos. Algumas das principais conclusões foram apresentadas por McGraw-Hill (2008, p. 2):

- Os Arquitetos foram os maiores usuários de BIM com 43% utilizando em mais de 60% de seus projetos, enquanto que empreiteiros (45%) utilizaram em menos de 15% dos projetos;
- Usuários que observaram impacto muito positivo sobre a produtividade da sua empresa foram 82%;
- A melhoria nos resultados dos projetos, tais como redução na solicitação de informações e de problemas de coordenação de campo, foi apontado por 79%;

- E os usuários, 62%, planejavam utilizar o BIM em mais de 30% de seus projetos em 2009.

Entre 2007 e 2012, a McGraw-Hill verificou que a percentagem de usuários do BIM na América do Norte teve um crescimento representativo, indo de 28% para 71%. Em 2015 a McGraw-Hill realizou nova pesquisa sobre o impacto do BIM na indústria AEC e entrevistou 391 profissionais sendo, 40 proprietários, 183 arquitetos, 68 engenheiros e 100 empreiteiros. Os temas levantados foram: redução do custo de construção final; aceleração da conclusão do projeto; compartilhamento de informação; maior produtividade do trabalho e outros. Os principais resultados foram:

- A melhora na execução da obra foi citada por grande parte dos empreiteiros (74%), proprietários (68%), engenheiros (65%) e arquitetos (64%);
- A melhor compreensão do projeto foi indicada pelos proprietários (73%), arquitetos (64%) e engenheiros (59%);
- Para os proprietários (40%) o BIM acelerou a conclusão da obra em no mínimo de 5%, já para 15% a conclusão foi antecipada em mais de 10% das obras;
- Para 41% dos empreiteiros o BIM reduziu custo de construção final em pelo menos 5%, já para 8% reduziram em mais de 10% do custo final;
- 87% dos proprietários e empreiteiros reportaram aumento da produtividade do trabalho nas obras;
- Para 74% dos arquitetos, engenheiros e empreiteiros a melhora no compartilhamento das informações reduziu as incertezas do projeto, que poderiam levar a alterações, retrabalho e perda do desempenho.

A aplicação das ferramentas BIM da indústria, com fluxos de trabalho digitais aprimorados em modelagem arquitetônica, para a incorporação de parâmetros para o intercâmbio de dados para análise térmica, proporcionaria uma maior transparência de intenções de projeto e problemas de coordenação. Possíveis decisões de design serão mais bem informadas, podendo resultar na rápida comparação interativa das alternativas de design, maior continuidade dos dados do projeto nas fases do projeto e menor chance de duplicação no esforço de projeto

para aumentar a eficiência energética dos edifícios residenciais (BEAZLEY; HEFFERNAN; MCCARTHY, 2017).

As implantações e suas discussões aumentam de intensidade à medida que organizações e organismos nacionais reconhecem o seu potencial de agregação de valor. A evidência disso foi o surgimento em alguns países, de diretrizes e relatórios dedicados a explorar e definir os requisitos e usos do BIM (quadro 5).

Quadro 5: Lista de guias publicamente disponíveis, relatórios e visões relativas ao BIM

País	Órgãos	Tipo e data	Descrição
Austrália	CRC-CI	Diretrizes e seis estudos de caso, 2008.	Destaca processos abertos e consistentes; testar a compatibilidade de software.
Dinamarca	BIPS	Diretrizes divididas em 4 volumes – 2007	Guia com 4 volumes: Manual CAD 3D, Método de trabalho 3D, Contrato de Projeto e camadas e Estruturas dos objetos
Finlândia	SENATE Properties	Diretrizes divididas em 9 volumes – 2007	Procedimentos operacionais gerais para projetos BIM e os requisitos gerais detalhadas de BIModels - foco na fase de projeto
Holanda	TNO	Estrutura apresentada pela internet – 2008	Estrutura consistente sobre BIM, dividida em 17 partes que descrevem o mundo BIM, constituindo uma Maneira de Pensar o BIM.
Noruega	STATS BYGG	Documento com base nas funções de modelagem	O teste IFC de grande escala documentando as experiências adquiridas em um projeto colaborativo.
Estados Unidos	AGC	Diretrizes (Versão 1) – 2006	Destina-se a ajudar os empreiteiros a entender como começar com BIM ou VDC.
	AIA	Guia – 2007	Abordagem que integra pessoas, sistemas, estruturas e práticas empresariais em um processo colaborativo para otimizar os resultados do projeto, aumentar o valor, reduzir o desperdício e maximizar a eficiência em todas as fases do projeto
	US-GSA	Diretrizes divididas em 7 séries – 2006	Destinado a associados US-GSA e consultores envolvidos em práticas de BIM para novos projetos de construção e os principais projetos de modernização.
	NIST	Diretrizes – 2007	Define padrões para a construção de intercâmbios de informação que visam apoiar contextos críticos de negócios usando padrão semântico e ontologias.
	USACE	Roteiro de uso do BIM para resolver desafios de tempo e custo do MILCON	Concentrar-se sobre a aplicação do BIM no Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA para obras de construção civil e processos de negócios de construção militares; integrar o USACE, parceiros da indústria e fornecedores de software.
	USCG	BIM Guias do usuário e Normas	Desenvolver e manter um padrão BIM
Europa	Consórcio de Órgãos	Relatório em vários volumes – 2006 a 2010	Informação Aberta do Meio Ambiente: Os processos de negócio e a organização necessária e As tecnologias subjacentes que suportam os processos de negócio.
		Projeto de Demonstração - 2002	CONCUR: trabalho entre parceiros na elaboração do projeto e construção com uso da internet baseado no ITC
		Relatório — 2008	Desenvolvimento e implementação de BIM: tecnologia, padrões e ações futuras.
		Processo de Desenvolvimento – 2007	Integração de normas de construção de desempenho com base em processos de negócio usando padrões IFC para melhorar a inovação e desenvolvimento sustentável.

Fonte: Succar 2009, adaptado e traduzido pelo autor.

O processo de implantação do BIM no Brasil tem crescido, mas precisa de melhorias para que possa de fato apresentar avanços à construção civil brasileira (GARBINI, 2012). O atraso do Brasil em relação aos países desenvolvidos é de 15 anos quanto a conhecer, integrar a cadeia produtiva, capacitar profissionais e trabalhar com a tecnologia (COVELO, 2011).

No Brasil a Associação Brasileira dos Escritórios de Arquitetura – AsBEA, lançou o Guia AsBEA Boas Práticas em BIM que é disponibilizado em dois fascículos. O Fascículo I, lançado em 2013, enfoca a *“Estruturação do Escritório de Projeto para a Implantação do BIM”* (AsBEA, 2013) e tem como público alvo os profissionais de arquitetura, engenharia e da construção civil, incluindo contratantes e construtores. O Fascículo II, de 2015, abrange o *“Fluxo de Projetos em BIM: Planejamento e Execução”* (AsBEA, 2015) e procura mostrar que a implantação do BIM requer novos métodos de trabalho e novas posturas de relacionamento entre arquitetos, projetistas, consultores, contratantes e construtores.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT tem lançado desde 2010 as séries de NBR 15965 e NBR ISO 12006, referentes ao *“Sistema de classificação da informação da construção”* e a *“Construção de edificação — Organização de informação da construção”*, respectivamente, disponibilizando as seguintes partes:

- ABNT NBR 15965-1:2011 – Parte 1: Terminologia e estrutura;
- ABNT NBR 15965-2:2012 – Parte 2: Características dos objetos da construção;
- ABNT NBR 15965-3:2014 – Parte 3: Processos da construção;
- ABNT NBR 15965-7:2015 – Parte 7: Informação da construção;
- ABNT NBR ISO 12006-2:2010 – Parte 2: Estrutura para classificação de informação.

A disponibilidade de diretrizes e relatórios ajuda a organizar o conhecimento de domínio, extrair conhecimento implícito e facilitar a criação de novos procedimentos relacionados ao BIM.

2.1.6.1. O que é modelo 3D e BIM

Modelos geométricos em 3D contêm muito pouca informação, ao contrário dos modelos BIM que contêm grande quantidade de informação. Um modelo 3D inclui uma representação geométrica tridimensional do edifício, enquanto que um BIM é organizado como um protótipo da construção, com andares do edifício, espaços, paredes, portas, janelas, e uma grande variedade de informações, parâmetros e regras associados com cada um desses elementos.

Conforme a *US. General Services Administration* (US-GSA), modelos 3D sozinhos não se qualificam como modelos BIM, sendo apenas uma parte do seu conceito, visto que a outra parte está contida no "I" do BIM, a Informação.

BIM é uma representação digital rica em dados catalogando as características físicas e funcionais do projeto e construção. Ela pode servir como uma base de conhecimento compartilhado que é manipulado diretamente (computável). Sua importância decorre de ter um intercâmbio aberto de informações entre plataformas e um registro transferível de construção de informações em todo o ciclo de vida de um edifício. BIM serve como uma base confiável para a tomada de decisão e fornece uma plataforma para análises automatizadas que podem ajudar nas atividades de planejamento, projeto, construção, operação e manutenção (US-GSA – BIM Guide Series 01, 2007, p. 4).

Eastman *et al* (2014) descrevem soluções de modelagem que não utilizam a tecnologia BIM, portanto, criam os seguintes tipos de modelos:

- Modelos que só contêm dados 3D, sem atributos de objetos (modelos utilizados para visualizações gráficas, não fornecem suporte de dados e análise de projeto);
- Modelos sem suporte para comportamento (modelos que não ajustam posicionamentos ou proporções, não empregam inteligência paramétrica);
- Modelos compostos de múltiplas referências a arquivos CAD 2D que devem ser combinados para definir a construção (o modelo 3D resultante não será factível, consistente e contabilizável);
- Modelos que permitem modificações em uma vista e que não fazem automaticamente as atualizações nas outras vistas (geram erros no modelo difíceis de detectar).

É importante entender que BIM não é apenas *software*, é um processo e *software*. BIM significa não apenas utilizar modelos tridimensionais inteligentes, com parâmetros, regras e objetos que permitem análises e estimativas de custos, mas também realizar mudanças significativas no fluxo de trabalho e processos de concepção do projeto (HARDIN, 2009 *apud* AZHAR, 2011).

2.1.6.2. Modelagem paramétrica

A modelagem paramétrica baseada em objetos surgiu nos anos 1980. Os objetos não são representados com geometria e propriedades fixas, ao contrário, os objetos são representados por parâmetros e regras que determinam a geometria, como também, com algumas propriedades e características não geométricas. “Os parâmetros e as regras permitem que os objetos se atualizem automaticamente de acordo com o controle do usuário ou mudanças de contexto” (EASTMAN *et al*, 2014, p. 25).

Conceitualmente, ferramentas de Modelagem da Informação da Construção (BIM) são modelos paramétricos baseados em objetos com um conjunto predefinido de famílias de objetos com comportamentos programados dentro deles. No projeto paramétrico é definida uma família de modelos ou uma classe de elementos, que é um conjunto de relações e regras como “anexado a”, “paralelo a”, “distante de”. Estas relações permitem controlar os parâmetros pelos quais as instâncias dos elementos podem ser geradas, mas cada uma irá variar conforme seu contexto, assim, as geometrias da forma e do conjunto ajustam-se automaticamente às modificações do projeto e aos controles do usuário (EASTMAN *et al*, 2014).

Conceito de objetos paramétricos é importante para o entendimento do BIM e sua diferenciação dos objetos 2D. Para tanto, os objetos paramétricos são definidos da seguinte maneira (EASTMAN *et al*, 2014, p. 14):

- Consistem em definições geométricas com dados e regras associadas;
- A geometria é integrada de maneira não redundante e não permite inconsistências. As dimensões não são “falsas”;
- As regras paramétricas para os objetos modificam automaticamente as geometrias associadas quando inseridas em um modelo de construção ou quando modificações são feitas em objetos associados;

- Os objetos podem ser definidos em diferentes níveis de associação e gerenciados em quaisquer níveis hierárquicos;
- As regras dos objetos identificam quando determinada modificação viola a viabilidade do objeto no que diz respeito a tamanho, construtibilidade, etc.;
- Os objetos podem ser vinculados e exportar conjuntos de atributos, como materiais estruturais, dados acústicos e dados de energia. para outros aplicativos e modelos.

Em um modelo paramétrico as características dos componentes e suas interações são definidas e reconhecidas, conservando uma relação consistente entre elementos. Por exemplo, em um projeto paramétrico de uma edificação, se é inserido ou retirado um componente porta em alguma parede, nela será automaticamente aberto ou fechado um vão, respectivamente (MARTINS, 2011).

Ibrahim *et al.* (2004) *apud* Garbini (2012) destacam o controle no nível de informação do modelo de acordo com a necessidade do desenho básico do projeto, detalhes construtivos e quantitativos até análises de desempenho. Os objetos paramétricos utilizados nos modelos podem possuir, de preferência, referências diretas a produtos desenvolvidos por fabricantes como janelas, peças pré-fabricadas, acessórios, dentre outros (AYRES, 2009).

Apesar de todas essas vantagens, todo o processo de compartilhamento de informações durante o desenvolvimento dos projetos é feito através de diversos *softwares* de desenho. Com a adoção de uma plataforma de dados neutra será possível fazer toda a troca de informações sem a perda dos dados, tornando dessa forma, a tecnologia BIM mais eficiente e confiável (GARBINI, 2012).

2.1.6.3. Aplicações, vantagens e desvantagens do BIM

Instituições e governos internacionais têm investido em pesquisas sobre BIM nos últimos anos. Destacam como referências na divulgação, investimento e adoção do sistema o *BuildingSMART*; o *National Institute of Building Sciences* – NIBS; a *Associated General Contractors of America* – AGC; o *U.S. General Service Administration* – US-GSA e a *Innovation in Building and Construction* – IBC (ANDRADE; RUSCHEL, 2009).

Órgãos governamentais em alguns países têm incentivado o uso da tecnologia BIM, seja por meio de investimentos em agências de pesquisa como o USACE, nos Estados Unidos, a STASBYGG, na Noruega e a INNOVA da Europa. Seja por regulamentações para aprovação e construção dos projetos que utilizam o BIM (ANDRADE; RUSCHEL, 2009).

A tecnologia BIM pode dar suporte e incrementar muitas práticas na indústria AEC. Mesmo que grande parte do setor ainda não tenha implantado o BIM no processo, ganhos significativos já foram alcançados pelos que o utilizam. Embora seja improvável que todas as vantagens disponibilizadas pelo BIM tenham sido apropriadas pelos usuários, o quadro 6 apresenta as possíveis aplicações da tecnologia BIM.

Quadro 6: Aplicações do BIM

Área	Aplicações
Fabricação de peças e componentes	Elaborar desenhos em 3D com dimensões reais, gerar detalhes e vistas 2D, lista de materiais e quantitativos.
Revisões de códigos, planos e normas.	Órgãos, entidades e autarquias públicas podem utilizar os modelos virtuais para simulação e análise de suas legislações.
Análise Forense	Um modelo virtual de construção pode ser adaptado para ilustrar graficamente laudos técnicos, jurídicos, planos de evacuação, etc.
Gerenciamento de Facilities	Departamento de gestão de <i>facilities</i> terá informações condizentes com o construído permitindo planejar as operações de manutenção.

Fonte: Azhar 2011, adaptado pelo autor.

Dentre as vantagens de se adotar o BIM, relacionadas com a modelagem, Kim (2012) *apud* Checcucci (2014, p. 47), relaciona:

[...] a maior precisão, eficiência e possibilidades de simulação, em comparação com trabalho em duas e três dimensões utilizando os tradicionais CAD (Computer Aided Design); os objetos utilizados no modelo têm um significado arquitetônico; a visualização tridimensional do projeto, proporcionando uma melhor compreensão do edifício; diferentes possibilidades de visualização das informações; conexão com projeto estrutural; ferramentas de cálculos energéticos; documentos integrados do projeto, com redução de erros; verificação de interferências para eliminar conflitos entre disciplinas; geração de planilhas de forma automatizada e em tempo real; melhor previsibilidade do quantitativo de materiais.

Para Florio (2007, p. 4-6) as vantagens dos sistemas BIM vão:

[...] desde a concepção, pois requer definição das propriedades e hierarquias diversas entre os objetos modelados, o que permite ajustar automaticamente quaisquer mudanças em função dos parâmetros pré-definidos. O inter-relacionamento entre os objetos permite que a modificação da altura de uma laje, por exemplo, acarrete ajustes automáticos na altura das paredes que estão conectadas à mesma; Aumento de produtividade, devido à visualização antecipada de diferentes soluções de projeto e de particularidades da edificação, como os aspectos estruturais, mecânicos, hidráulicos, hidrossanitários, sendo capazes de efetuar análise de dados aprimorada, podendo-se simular diversos partidos de projeto em comparação aos requisitos de custo, técnicos, ambientais e do contexto em que o empreendimento se insere.

Já Kymmell (2008) *apud* Checcucci (2014, p. 47) com a adoção da tecnologia BIM em relação à construção da edificação, as vantagens identificadas são:

[...] melhoria na comunicação entre membros da equipe; antecipação de problemas; aumento da segurança na obra; redução de custos; desenvolvimento em paralelo de processos produtivos; possibilidade de pré-fabricação de componentes e até de conjuntos ou partes da edificação; redução do tempo de construção; melhoria no planejamento da obra, na confecção e acompanhamento do cronograma, na qualidade do projeto e da sua representação gráfica, do desempenho da edificação ao longo de seu ciclo de vida; dentre outros.

O BIM apresenta vantagens em 4 etapas da edificação, indo desde a pré-construção até a etapa de pós-construção (EASTMAN *et al.*, 2014). O quadro 7 apresenta os benefícios do uso BIM para cada etapa.

Quadro 7: O uso do BIM

	Benefícios	Descrição
Pré-construção	Conceito, viabilidade e benefícios no projeto.	Modelo de construção aproximado ao construído, vinculado a uma base de dados de custos e quantidades.
	Aumento da qualidade e do desempenho da construção	Desenvolver modelo esquemático antes do modelo detalhado permite uma avaliação criteriosa do esquema proposto, determina o cumprimento dos requisitos funcionais e de sustentabilidade através de análise e simulações.
Projeto	Visualização antecipada e mais precisa de um projeto	O modelo 3D gerado ferramenta pode ser usado para visualizar o projeto em qualquer etapa do processo com a expectativa de que terá dimensões consistentes em todas as vistas.
	Correções automáticas de baixo nível nas mudanças realizadas no projeto	Os objetos usados no projeto são controlados por regras paramétricas, tornando o modelo 3D contrutível. Isso reduz a necessidade de o usuário gerenciar as mudanças no projeto.
	Gerar desenhos 2D precisos e consistentes	Reduz significativamente o tempo e o número de erros associados com a geração de desenhos de construção.
	Colaboração entre as disciplinas de projeto	Facilita o trabalho simultâneo de múltiplas disciplinas de projeto. Reduz o tempo e os erros de projeto, assim como as omissões, possibilitando as oportunidades de melhoria contínua.
	Verificação facilitada das intenções de projeto	Permite visualizações 3D e quantifica as áreas dos espaços e quantidades de materiais, permitindo estimativas de custos mais cedo e precisas.
	Extração de estimativas de custo durante a etapa de projeto	Nas fases iniciais as estimativas de custos são baseadas no custo unitário por área. Com o avanço, os quantitativos são mais detalhados e a estimativa de custos mais precisa. Na etapa final, os quantitativos para todos os objetos contidos dentro do modelo permitem uma estimativa de custos final mais precisa.
	Eficiência energética e a sustentabilidade	Vincular o modelo a ferramentas de análise energética permite a avaliação nas fases iniciais do projeto, proporciona oportunidades para melhorar a qualidade da construção.
Construção e Fabricação	Sincronização de projeto e planejamento da construção	É possível simular o processo de construção e mostrar a aparência da construção e do canteiro em qualquer ponto no tempo.
	Deteção de interferências antes da construção	Todas as disciplinas podem ser colocadas juntas e comparadas, e os conflitos são identificados antes que sejam detectados na obra.
	Antecipar problemas de projeto ou do canteiro	Mudanças no projeto podem ser introduzidas no modelo da construção com atualizações automáticas.
	O modelo como base para componentes fabricados	Representação precisa dos objetos da construção para fabricação de componentes pré-moldados fora do canteiro.
	Técnicas de construção enxuta	Fornecer um modelo preciso do projeto e dos recursos requeridos proporciona a melhoria no planejamento e no cronograma.
	Sincronização da aquisição de materiais do projeto e a construção	Quantidades, especificações e propriedades contidas no modelo completo são usadas para adquirir materiais de fornecedores.
Pós-construção	Melhor gerenciamento e operação das edificações	O modelo da construção proporciona uma fonte de informações para todos os sistemas usados em uma construção.
	Integração da operação e gerenciamento de facilidades	Um modelo de construção que foi atualizado com todas as modificações feitas durante a construção é uma fonte precisa de informações sobre como os espaços e sistemas foram construídos.

Fonte: Eastman *et al* 2014, adaptado pelo autor.

Para Florio (2007), o BIM e o processo colaborativo aplicado na metodologia de projeto contribuem (FLORIO, 2007, p. 5-6):

1. Melhorar a visualização dos dados e informações sobre o projeto, assim como tornar claras as exigências do cliente já nas fases iniciais do projeto, permitindo compreender e participar ativamente do processo;
2. Contribuir para melhorar a eficiência e qualidade da construção civil, com intenção de reduzir custos e desperdícios de materiais e melhorar o aproveitamento de mão-de-obra;
3. Aprimorar a coordenação dos documentos compartilhados da construção a fim de promover tanto a rápida troca de informações, como aumentar a produtividade e melhorar os prazos de entrega dos projetos destinados à execução da obra;
4. Proporcionar uma gestão de projetos que incorpore e compartilhe informações e distribua responsabilidades, riscos e recompensas entre os participantes do projeto;
5. Incorporar e disseminar informações oriundas de fabricantes dos materiais para quantificar e estimar custos.

A *Stanford University's Center for Integrated Facilities Engineering*, por intermédio de dados coletados de 32 grandes projetos, observou como benefícios a adoção do BIM (AZHAR, 2011):

- Redução de até 40% em mudanças que não foram orçadas,
- Economia de até 3% na estimativa de custos comparada às estimativas tradicionais,
- Uma redução de até 80% no tempo necessário para gerar uma estimativa de custo,
- A economia de até 10% do valor do contrato através de detecções de conflitos,
- Redução de até 7% no tempo de projeto.

Dentre os vários pontos que dificultam a adoção do BIM, os mais comuns são: a resistência às mudanças; o custo para a aquisição de equipamentos e programas; o custo e tempo para o treinamento da equipe; a colaboração e integração entre profissionais e os papéis e responsabilidades de cada profissional no processo (CHECCUCCI, 2014).

Checucci, Pereira e Amorim (2013), em pesquisa realizada no ano de 2011 no Brasil, constataram que a falta de mão de obra qualificada, a não existência de bibliotecas de objetos com características e informações específicas do cenário

brasileiro e o fator cultural, que provoca resistência às mudanças nos processos de trabalho, foram assinalados como grandes problemas para a adoção do BIM.

O que também dificulta a adoção do BIM é como resolver a questão de como será repartido os custos de implantação da tecnologia BIM, assim como os benefícios oriundos de sua utilização, entre o grupo de usuários do modelo (CHECCUCCI, 2014).

Sendo um novo processo, diferente do tradicional e com grande abrangência, é de se esperar que para a adequada implementação do BIM sejam necessárias alterações nas formas de trabalho habituais praticadas nos empreendimentos da construção. A colaboração é fomentada e facilitada pelo processo BIM, mas requer mudanças de comportamentos dos vários agentes envolvidos no processo o que, por sua vez, demanda alterações nos contratos buscando equilibrar responsabilidades e compensações (SANTOS, 2012, p. 27).

Amorim e Checcucci (2011) analisaram quatro cenários e identificaram atributos que promovem ou inibem a adoção do BIM no Brasil, cuja síntese do trabalho encontra-se apresentado no quadro 8.

Quadro 8: Aspectos favoráveis e desfavoráveis para a adoção do BIM

Cenários analisados	Aspectos favoráveis à adoção	Aspectos desfavoráveis à adoção
Atributos da tecnologia BIM	<p>Vantagem relacionada aos padrões e processos ora utilizados, tanto nos aspectos qualitativos quanto nos econômicos e financeiros, considerando-se o ciclo de vida da edificação.</p> <p>Compatibilidade, em relação a possibilidade de adoção de outras tecnologias inovadoras.</p> <p>Possibilidade de experimentação de ferramentas.</p> <p>Boa visibilidade para empresas adotantes.</p> <p>Pouca incerteza técnica, financeira e social.</p>	<p>Pouca compatibilidade em relação aos valores e formação atuais dos profissionais de AEC. (Necessidade de capacitação de profissionais para trabalhar com BIM).</p> <p>Complexidade. (Grande)</p> <p>Possibilidade de experimentação de processos colaborativos. (Existe, porém com altos custos).</p>
Atributos dos fornecedores e desenvolvedores de <i>software</i>	<p>Atende a várias necessidades do setor da construção.</p> <p>Existe possibilidade de reduzir o risco da adoção, seja através da contratação de consultores especializados ou através da adoção conjunta por equipes de trabalho.</p> <p>Boa reputação das empresas desenvolvedoras de <i>software</i>, algumas com vários anos de atuação no mercado.</p>	<p>Pouco foco no cliente, quando considerada a necessidade de capacitação dos agentes do setor.</p> <p>Pouca divulgação, pouca bibliografia nacional sobre o tema e falta de amadurecimento dos processos e métodos de trabalho.</p> <p>Dependência do fornecedor. Apesar de ser possível a migração para outras plataformas de trabalho, ela traz altos custos.</p>
Atributos da indústria da construção civil	<p>Pouca incerteza em relação ao mercado, uma vez que estudos mostram que a adoção do BIM é uma tendência no país.</p>	<p>Externalidades da rede (pequena quantidade de empresas que já adotaram BIM).</p> <p>Pressão competitiva (ainda pequena).</p> <p>Características da cadeia produtiva (setor pulverizado, com grande número de pequenas empresas).</p> <p>Ausência de regulamentação governamental.</p>
Características das empresas adotantes	<p>Uma tendência na consolidação e construção de redes sociais com o trabalho em equipes multidisciplinares aumenta a difusão e a taxa de adoção.</p>	<p>Necessidade de comprometimento da alta administração para adotar o BIM.</p>

Fonte: Checcucci (2014, p. 54)

O BIM tem permitido que a Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) alcancem a interoperabilidade e integração de dados entre os diferentes componentes do sistema construtivo. Permite integrar as descrições de uma edificação, tais como geometria 3D, materiais, estruturas, sistemas de ar condicionado, elétrica, hidrossanitário, entre outros, em um formato que pode ser usado para analisar o desempenho energético do edifício (KIM; WOO, 2011).

2.1.7. Interoperabilidade

Num sistema integrado, o grau de vinculação (o quanto estão intimamente ligados) indica componentes interdependentes, que não podem ser separados. No caso da interoperabilidade os componentes estão conectados por uma rede de comunicação onde há interação, troca de serviços e operação em seu local original (VERNADAT; CHEN; DOUMEINGTS, 2008). A interoperabilidade significa convivência, autonomia e ambiente associado; enquanto a integração está mais ligada aos conceitos de coordenação, coerência e uniformização. Desta forma, dois sistemas integrados são inevitavelmente interoperáveis, mas dois sistemas interoperáveis não são necessariamente integrados (CHEN; DOUMEINGTS, 2003).

Vernadat; Chen; Doumeingts (2008) complementam que dois sistemas são considerados como integrado, se houver um formato padrão detalhado para todos os componentes constituintes. A interoperabilidade é mais relacionada com a abordagem unificada. Há uma estrutura comum através de modelos constitutivos, fornecendo uma abordagem federada onde os modelos são dinâmicos em vez de serem modelos pré-determinados.

Para Isikdag *et al.* (2007) integração de programas consiste no trabalho conjunto de diferentes ferramentas com intuito de agregar funcionalidade. Integração é definida por Wong; Lia; Wangb (2005) como um procedimento que interliga programas, sistemas e dispositivos em uma única estrutura para compartilhar dados. Deste modo, um sistema integrado deve ser capaz de disponibilizar aos usuários serviços associados através de programas que agregam ferramentas com funções distintas para um único objetivo (STAVRIDOU, 1999 *apud* LEE *et al.*, 2015).

A palavra "interoperar" implica que um sistema executa uma operação para outro sistema (VERNADAT; CHEN; DOUMEINGTS, 2008). Do ponto de vista da AEC, a interoperabilidade é a capacidade gerencial e de compartilhamento eletrônico dos dados do produto entre colaboradores do projeto (MCGRAW HILL, 2007). Pode ser definida como "a capacidade de dois ou mais sistemas, ou componentes, para trocarem informações e usarem as informações que foram trocadas" (IEEE, 1990 *apud* GRILO; GONÇALVES, 2010, p. 525).

De acordo com Lam *et al.* (2012, p. 3), é possível dividir em três “gerações” o desenvolvimento da tecnologia da informação referente ao intercâmbio de dados na indústria da construção:

1. Primeira geração de modelos de intercâmbio de dados concentra-se principalmente em informações sobre a geometria do prédio. É necessário, mas insuficiente para qualquer projeto baseado em análise de desempenho;
2. A segunda geração de modelos de intercâmbio de dados passou a incluir informações específicas na modelagem para análise de desempenho, tais como a energia/simulação de conforto térmico, projeto de ar condicionado, projeto de iluminação, análise do ciclo de vida e a verificação das etapas de construção;
3. A terceira geração, a atual, os modelos são capazes de contemplar todas as informações relacionadas a uma edificação. O esquema abrangente de dados facilita a partilha de informações pertinentes a todo o ciclo de vida de construção do projeto (para avaliar o desempenho total do prédio), à construção (para avaliar o custo e cronograma) e operação (ocupação, análise ambiental e controles do sistema).

Neste processo de compartilhamento as informações armazenadas nos modelos de projeto de construção são transferidas para ferramentas de eficiência energética da edificação, de modo que a simulação e análise do desempenho ocorram sem a necessidade de correção de erros oriundos do processo de compartilhamento das informações (GARCIA; ZHU, 2015).

No entanto, dois fatores afetam a comunicação: a troca de dados entre o projeto e modelos de análise e a agregação dos resultados da simulação para alcançar a transparência no processo de avaliação do projeto. Como o modelo de informações de construção muda continuamente durante o processo do ciclo de vida do edifício, a interoperabilidade deve ser facilitada através de intercâmbios de dados estruturados (SANGUINETTI; EASTMAN; AUGENBROE, 2009).

Como os conjuntos de informações necessários para analisar o consumo de energia da construção são bastante complexos e incluem dados sobre o ambiente externo, a forma e configuração do edifício, cargas de equipamentos, sistemas de iluminação e condicionamento de ar, a integração das ferramentas BIM e BEM devem permitir um consistente compartilhamento de dados (MOTAWA, CARTER, 2013).

Desta forma, a interoperabilidade precisa ser uma troca de dados sem costura para não gerar dados duplicados. Deve permitir a atualização bidirecional de informações

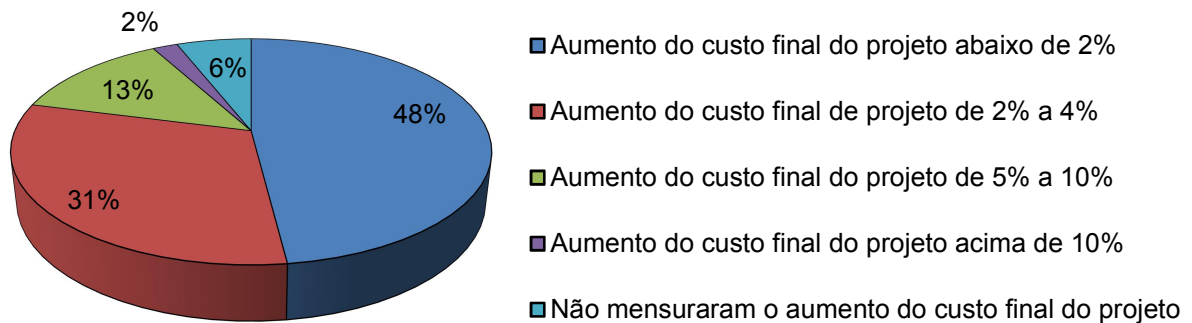
do modelo de forma que as mudanças realizadas em um programa devem ser capazes de fluir entre as ferramentas (KUMAR, 2008). Assim, a transferência de dados entre os programas desempenha papel fundamental a fim de reduzir o retrabalho e criar de forma simples os modelos de eficiência energética (BAZJANAC, 2008).

A carência na interoperabilidade entre os aplicativos BIM e BEM (ou seja, a correta troca e interpretação da informação) é um dos principais obstáculos para a efetiva utilização massiva do BIM (McGRAW HILL, 2007). Estes problemas de interoperabilidade incluem, mas não estão limitados à reentrada equivocada de dados, informações insuficiente do produto disponibilizada ao outro aplicativo, que geram grandes perdas da geometria e de informações paramétricas (LAM *et al.*, 2012).

O *U.S National Institute of Standards and Technology* (NIST) constatou que as perdas de eficiências decorrentes dos problemas de interoperabilidade geram custo adicional anual de US\$ 15.8 bi ao mercado de capital americano, incluindo comércio, indústria e instituições (GALLAHER *et al.*, 2004 *apud* GARCIA; ZHU, 2015).

A McGraw-Hill (2007) realizou um levantamento com as empresas de construção e constatou que a falta de interoperabilidade eleva os custos para as indústrias em média 3,1% do custo total do projeto. A figura 5 demonstra que entre os pesquisados, 48% acreditam que a falta de interoperabilidade acrescenta menos de 2% aos custos, enquanto 31% estimam que acrescente entre 2% e 4%. Já 13% relatam que os custos ficam entre 5% e 10%, e 2% disseram adicionar mais de 10% aos custos. Dos entrevistados 6% não sabiam mensurar o aumento de custo. Para os engenheiros o acréscimo é de 4%, enquanto os proprietários estimam em 2,5%.

Figura 5: Porcentagem de aumento de custo devido à falta de interoperabilidade



Fonte: Adaptado de McGraw-Hill 2007

Desde a pesquisa da McGraw-Hill sobre a interoperabilidade na indústria AEC o investimento no compartilhamento de informações entre os *softwares* BIM e BEM tem aumentado, como a criação e atualização de formatos de intercâmbio de informações e lançamentos de pacotes de softwares que permitem troca de informações direta, utilizando programas de mesmo fabricante. Em vez de restringir o uso dos programas da mesma empresa, a outra possibilidade é promover esquemas de padrão aberto para a troca de informações entre os aplicativos de diferentes empresas. Contudo, a troca utilizando esquemas abertos ainda não é totalmente suportada entre todos os programas, o que pode acarretar um grande número de imprecisões geométricas e perda de informação paramétrica durante o processo de intercâmbio de informações (GARCIA; ZHU, 2015).

Os meios mais comuns de intercâmbios de dados entre aplicativos BIM e BEM são:

1. Formatos proprietários, ligação direta entre aplicativos de mesmo fabricante. Exemplos: Revit e Green Building Studio (Autodesk); MicroStation e AECOSim Energy Simulator (Bentley);
2. Formatos públicos de intercâmbios de dados. Exemplos: IFC (Industry Foundation Classes) e o XML (eXtensible Markup Language).

A fim de proporcionar a interoperabilidade entre as aplicações de programas de diferentes empresas foram criados os esquemas de padrão aberto, que oferecem regras necessárias para apoiar a troca de dados relacionados com a indústria AEC

(OWOLABI, 2003). Uma das principais razões da criação dos esquemas de padrão aberto está relacionada à dificuldade e complexidade do desenvolvimento de soluções que integrem os diferentes programas disponíveis (GARCIA; ZHU, 2015). Kumar (2008) afirma que para um processo de análise de energia de construção bem sucedido, a troca das informações de construção do modelo entre BIM e BEM devem ser diretos e sem barreiras.

Um fator chave para o sucesso de um esquema de compartilhamento de dados está na ampla adoção por toda a indústria de arquitetura, engenharia e construção (AEC). Atualmente, a *Industry Foundation Classes* (IFC) e *Green Building XML* (gbXML) são as duas principais extensões predominantes de compartilhamento de informação na indústria AEC. Algumas ferramentas de simulação existentes e suas interfaces gráficas de usuários foram adequadas para a troca de dados com o BIM através desses esquemas, que contêm informações de geometria de construção, cargas internas, ocupação, configuração do sistema e horários de utilização. (MAILE; FISCHER; BAZJANAC, 2007 e DONG et al. 2007).

O IFC é um dos principais formatos públicos e seus modelos carregam propriedades dos objetos, materiais e geometrias. Estas são essenciais para a interface com aplicações de análise ambiental e de gerenciamento das construções. O XML (eXtensible Markup Language) é uma extensão para o HTML, a linguagem base da web. O XML permite a definição da estrutura e significado dos dados. Os diferentes XML suportam o intercâmbio de variados tipos de dados entre os aplicativos.

A conexão entre os modelos BIM e as ferramentas BEM através dos esquemas de dados padrão é uma área de pesquisa em desenvolvimento. Algumas ferramentas BEM foram adequadas para utilizar o BIM e outras foram desenvolvidas para serem compatíveis com as ferramentas de criação BIM (AKSAMIJA, 2012; KIM et al. 2015).

Os desafios de projetar edifícios complexos de alto desempenho exigem uma mudança de paradigma, do tradicional processo sequencial para um projetar interativo e simultâneo. Isto implica na necessidade de adotar novos processos de projetar integrados e reestruturar as ferramentas de suporte computacional associada ao modelo (WONG et al., 2004 *apud* LAM et al., 2012).

2.1.7.1. IFC – buildingSMART

A *Industry Foundation Classes* (IFC) é um modelo neutro de dados de produtos AEC, com formato de dados aberto. Este formato de arquivo é orientado a objetos desenvolvidos para a indústria de construção e é comumente usado pelo BIM para facilitar a interoperabilidade entre plataformas de *software*.

A sua criação data de 1995, quando a Autodesk iniciou um consórcio de indústrias para assessorar a companhia no desenvolvimento de um conjunto de classes C++ que poderiam suportar um desenvolvimento integrado de aplicações. Doze companhias dos Estados Unidos se juntaram nesse consórcio, conforme o quadro 9.

Quadro 9: As 12 empresas fundadoras da IAI

Empresas	
Autodesk	Jaros Baum & Bolles
Archibus	Lawrence Berkeley Laboratory
AT&T	Primavera Software
Carrier Corporation	Softdesk Software
HOK Architects	Timberline Software
Honeywell	Tishman Construction

Fonte: www.buildingsmart.org, acessado em 12 dez 2017

Inicialmente definida como *Industry Alliance for Interoperability*, em 1995 a Aliança abriu-se para que todos os interessados se tornassem membros. Em 1996, com representantes da América do Norte, Europa e Ásia, mudou o nome para *International Alliance for Interoperability* (IAI).

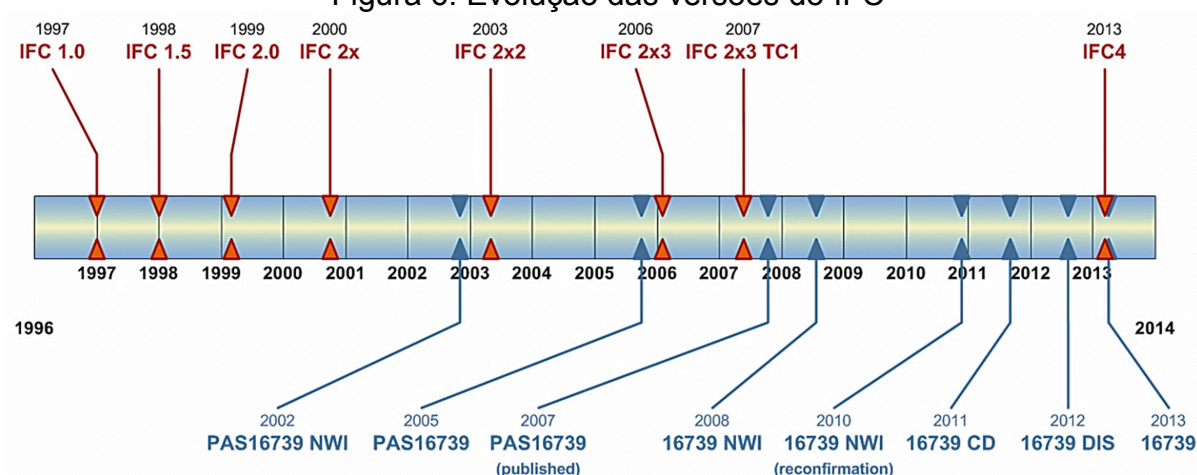
Em 11 de janeiro de 2008, o IAI mudou seu nome para *buildingSMART* para refletir melhor a natureza e os objetivos da organização. O *buildingSMART* atua na Indústria da Construção Civil e também na Indústria de Infraestrutura.

A comunidade *buildingSMART* é formada por 78 Guias BIM (BIM Guides) distribuídos por 15 países e são responsáveis por difundir, pesquisar e implantar o esquema IFC. Fazem parte desta comunidade a *CORONET* (Singapura), a *ACIF & APCC Building and Construction Procurement Guide* (Austrália), a *CANBIM* (Canadá), a *National BIM Survey 2013* (Chile), a *bips CAD Manual* (Dinamarca), a *HKIBIM* (Hong Kong), a *COBIM* (Finlândia), a *Statsbygg BIM Manual 1.2* (Noruega),

a *Dutch National BIM Guidelines* (Holanda), a *BIM Anatomy I* (Suécia), a *uBIM* (Espanha), a *BoligBIM* (Noruega), dentre outros países (*buildingSMART* 2015).

A *buildingSMART* busca sempre melhorar as versões de IFC, seja lançando novas ou aprimorando as vigentes. A versão mais atual a IFC4 (IFC 2x4) foi apresentada em 2014. Contudo, a versão IFC 2x3 está disponível desde 2008 e continuará em 2016, conforme pode ser observado na figura 6 que mostra a evolução das versões do IFC.

Figura 6: Evolução das versões do IFC



Fonte: www.buildingsmart.org, acessado em 10 nov 2016

A versão IFC4 reconhece cerca de 800 entidades (objetos de dados), 358 conjuntos de propriedades e 121 tipos de dados. Enquanto estes números indicam complexidade, também refletem a riqueza de informações da construção e propriedades específicas dos modelos, abordando sistemas diferentes, que vão desde análise energética à estimativa de custo para rastreamento de materiais e programação (CHEN *et al.* 2005 e CEMESOVA *et al.* 2015)

Os modelos IFC incluem elementos da construção, (paredes genéricas, pisos, portas e janelas), elementos estruturais (pilares, vigas e lajes), elementos de sistemas prediais (hidráulica, elétrica e ar condicionado), elementos de processos e gerenciamento (quantitativos), o quadro 10 apresenta alguns desses conteúdos.

Quadro 10: Determinadas entidades IFC e suas propriedades

Entidades	Propriedades
'IfcBuilding'	Reconhece o nome, o tipo e o endereço dos edifícios.
'IfcObjectPlacement'	Reconhece as informações de posicionamento de um objeto, que podem ser: absoluto (em relação à coordenada global), relativo (em relação a outro objeto) ou limitado (em relação aos eixos da grade).
IfcLocalPlacement	Reconhece o posicionamento relativo do objeto em relação a uma referencia espacial
'IfcZone'	Reconhece a zona térmica do modelo.
'IfcProductRepresentation'	Reconhece a forma de um objeto
'IfcShapeRepresentation'	Seus atributos descrevem geometria de elementos de construção
'IfcRelDefinesByType'	Reconhece a definição de detalhes mais específicos sobre objetos
'Pset_DoorCommon' e 'Pset_WallCommon'	Reconhece as portas e paredes, inclui a propriedade 'IsExternal' que identifica se são externas e se deveriam ser incluídas no cálculo térmico da envoltória.
'IfcRelDefinesByProperties'	Reconhece as propriedades definidas pelo usuário, como a eficiência.

Fonte: Chen *et al.* (2005) e Cemesova *et al.* (2015), adaptado pelo autor

O modelo IFC exportado contém propriedades necessárias para a avaliação de desempenho energético, tais como a construção de geometria, tipo de construção, a informação térmica, e demais conteúdos. Esta informação é importada de forma direta ou indireta pelo programa de simulação energética e os resultados da análise são refletidos nos projetos alternativos que são então desenvolvidos (CHOI, KIM, KIM, 2010).

Ainda que o IFC seja capaz de reconhecer uma ampla gama de informações dos projetos de construção, de engenharia e de produção, o universo de elementos a serem intercambiadas na indústria AEC é enorme.

2.1.7.2. Green Building XML - gbXML

O esquema *Green Building XML*, conhecido como "gbXML", foi desenvolvido para facilitar a transferência de informações armazenadas em modelos de construção, permitindo a interoperabilidade entre os *softwares* de projeto e uma grande variedade de ferramentas de análise de engenharia e energia disponíveis hoje.

O XML (*Extensible Markup Language*) é um tipo de linguagem de computador que permite programas de software compartilhar informações com pouca ou nenhuma interação humana. Esta abordagem permite aos projetistas se concentrarem na concepção estética de edifícios ambientalmente responsáveis que utilizam

tecnologias para atender às necessidades de seus clientes com o menor custo (MOON *et al.* 2011).

Fornece esquema alternativo de linguagens e mecanismos de transporte, especialmente adequado para uso da Web. XML é uma extensão de HTML (*HyperText Markup Language*), a linguagem usada para enviar informações através da Web, e é utilizado para representar as informações de construção, tais como a geometria e as propriedades do material, para simulação de consumo de energia (EASTMAN *et al.*, 2014).

De acordo com Lam *et al* (2012), o *Green Building Studio* (antigo *GeoPraxis*) iniciou em 1999 o desenvolvimento do *Green Building XML* (gbXML) com o financiamento da *California Energy Commission Public Interest Energy Research Program* (PIER), e a *California Utilities* (*Pacific Gas and Electric Company*, *Southern California EDISON* and *Sempra Energy Utility*). A figura 7 mostra a evolução cronológica do gbXML.

Figura 7: Evolução cronológica do gbXML



Fonte: www.gbxml.org, acessado em 08 nov2016

O *Green Building XML* tem o apoio da indústria da construção e ampla adoção por parte das principais indústrias de softwares *Autodesk*, *Graphisoft*, e *Bentley*. O quadro 11 apresenta as empresas que compõem a diretoria da *Open Green Building XML Schema*.

Quadro 11: Empresas que compõem a diretoria da Open Green Building XML Schema

Empresas	
Carmel Software	IES Virtual Environment
U.S. Department of Energy	Trane
National Renewable Energy Lab (NREL)	Western Allied Mechanical, Inc.
Autodesk	EDSL
Bentley Systems	HVAC Solution

Fonte: www.gbxml.org, acessado em 08 nov 2016

Com o desenvolvimento de capacidade de exportação e importação em várias ferramentas de modelagem de engenharia, gbXML se tornou um esquema padrão das indústrias dominantes. Sua utilização simplifica a transferência de informações de construção para modelos de engenharia (LAM *et al*, 2012).

O gbXML permite compartilhar modelos geométricos desenvolvidos no BIM, sem recriar a geometria do edifício na própria ferramenta de simulação, acarretando em economia expressiva de tempo. Significa que na prática as propriedades térmicas dos elementos de construção, tais como a condutividade térmica e calor específico são exclusivamente derivados de BIM e diretamente transferidos para o programa de simulação de energia (HAM; GOLPARVAR-FARD, 2015).

A precisão das propriedades térmicas de modelagem, como a Resistência Térmica (R) ou a Transmitância Térmica (U) para elementos de construção, é um dos fatores mais influentes no cálculo das cargas térmicas e dos consumos de energia associados (LAGÜELA *et al.*, 2014). Na prática, essas propriedades são obtidas a partir de dados genéricos de material de construção disponíveis no BIM ou especificadas em normas.

Vários programas BIM (Revit e ArchiCAD) e de análise (DOE-2, e-QUEST, EnergyPlus, Green Building Studio e VE) são conhecidos por apoio gbXML (DONG *et al.* 2007; LAM *et al*, 2012).

2.2. PESQUISAS REALIZADAS EM INTEROPERABILIDADE ENTRE BIM E BEM

O compartilhamento de dados é inerente ao universo digital, no entanto, a troca de dados não é universal, pois, os programas precisam ter algum tipo de interação entre si. Com o advento do sistema CAD foi possível desenvolver ferramentas que

facilitaram a troca de dados referentes à AEC, contudo, as informações eram representações gráficas e não continham as reais propriedades e formas dos componentes das edificações que os desenhos simulavam.

Como no sistema BIM os componentes, peças e sistemas da edificação possuem dados físicos, ambientais, comerciais e funcionais, quando ocorre a interoperabilidade entre as ferramentas, todas as informações poderão ser compartilhadas, dependendo da relação existente.

Para tanto, existem as “Dimensões do Sistema BIM” que relacionam a forma como o modelo é criado e programado com os tipos de informações que serão retiradas dele. Comumente são detalhadas as dimensões 3D, 4D, 5D, 6D e 7D, (figura 8), sendo que há uma variação entre o que as 6D e 7D abordam. Trabalhos atribuem ao 6D a sustentabilidade da edificação e para o 7D o gerenciamento de manutenção da edificação, contudo, pode ser encontrada estas atribuições trocadas entre as dimensões.

Figura 8: Dimensões BIM



Fonte: Elaborado pelo autor

Como a premissa da pesquisa é a sustentabilidade da edificação (dimensão 6D do BIM), com foco principal em eficiência energética e desdobramentos em interoperabilidade e esquemas de compartilhamento, foram definidas 4 categorias

para classificar as publicações: Eficiência Energética; IFC; gbXML e Interoperabilidade.

Foram definidas como base de dados para a pesquisa das publicações o *Science Direct* e o *Infohab*, buscados em artigos de revistas e conferências de 2007 a 2017, em inglês e português. A escolha teve como critério principal englobar ao menos duas categorias nos trabalhos publicados, tendo como categoria principal a Eficiência Energética e obrigatoriamente presente em todas as publicações, desta forma, as linhas de pesquisa nas bases de dados foram: *energy efficiency and interoperability*; *energy efficiency and IFC*; *energy efficiency and gbXML*; *energy efficiency and interoperability and IFC*; *energy efficiency and interoperability and gbXML*; *energy efficiency and interoperability and IFC and gbXML*; totalizando 52 publicações pesquisadas, conforme apresentado no quadro 12.

Quadro 12: Publicações relevantes que abordam o compartilhamento, padrões e sustentabilidade (continua).

Publicações		Nº
Eficiência Energética	(Maile, Fischer, Bazjanac, 2007; McGraw Hill, 2007; Dong et al., 2007; Bazjanac, Kiviniemi, 2007; Kumar, 2008; Bazjanac, 2008; Sanguinetti, Eastman, Augenbroe, 2009; Shen et al. 2010; McGraw Hill, 2010; Ferrari, Silva, Lima, 2010; Osello et al. 2011; Moon et al. 2011; Sokolov, Crosby, 2011; Martins, 2011; Eastman et al. 2011; Attia, 2011; Lam et al. 2012; Kim, Kim, Seo, 2012; Welle, Rogers, Fischer, 2012; Freire, Tahara, Amorim, 2012; Motawa, Carter, 2012; Aksamija, 2012; Martins, Silva, 2013; Asl, Zarrinmehr, Yan, 2013; O'donnell et al. 2013; Maile, O'donnell, Bazjanac, 2013; Bahar et al. 2013; Kota et al. 2014; Díaz-Vilariño, et al. 2014; Asl et al. 2014; Ahna et al. 2014; Dong, O'Neill, 2014; Garcia, Zhu, 2015; Prada-Hernández et al. 2015; Ham, Golparvar-Fard, 2015; Kim, Woo, 2015; Asl et al. 2015; Oliveira, Scheer, Tavares, 2015; Ferreira et al. 2015; U.S. GSA, 2015; Kim et al. 2015; Di Giuda, Villa, Piantanida, 2015; Kim et al. 2016; Choi et al. 2016; Abanda, Byers, 2016; Kuo et al. 2016; Gerrisha et al. 2017; Maltese et al. 2017 Chong, Lee, Wang, 2017; Beazley, Heffernan, Mccarthy, 2017; Arayici et al. 2017; El-Dirabya, Krijnenb, Papagelisc, 2017)	52
IFC – Industry Foundation Classes	(Maile, Fischer, Bazjanac, 2007; McGraw Hill, 2007; Dong et al., 2007; Bazjanac, Kiviniemi, 2007; Kumar, 2008; Bazjanac, 2008; Sanguinetti, Eastman, Augenbroe, 2009; Shen et al. 2010; McGraw Hill, 2010; Ferrari, Silva, Lima, 2010; Osello et al. 2011; Moon et al. 2011; Eastman et al. 2011; Attia, 2011; Lam et al. 2012; Kim, Kim, Seo, 2012; Welle, Rogers, Fischer, 2012; Freire, Tahara, Amorim, 2012; Motawa, Carter, 2012; O'donnell et al. 2013; Maile, O'donnell, Bazjanac, 2013; Bahar et al. 2013; Kota et al. 2014; Ahna et al. 2014; Dong, O'Neill, 2014; Garcia, Zhu, 2015; Prada-Hernández et al. 2015; Kim, Woo, 2015; Asl et al. 2015; Oliveira, Scheer, Tavares, 2015; Ferreira et al. 2015; U.S. GSA, 2015; Kim et al. 2015; Kim et al. 2016; Choi et al. 2016; Gerrisha et al. 2017; Maltese et al. 2017 Chong, Lee, Wang, 2017; Beazley, Heffernan, Mccarthy, 2017; Arayici et al. 2017; El-Dirabya, Krijnenb, Papagelisc, 2017)	41

Fonte: Elaborado pelo autor

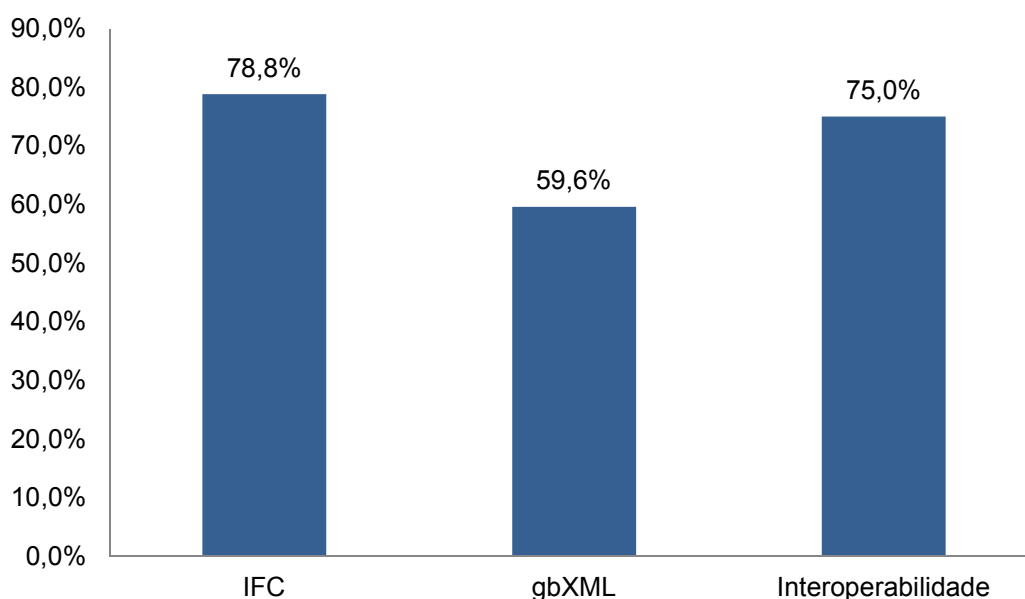
Quadro12: Publicações relevantes que abordam o compartilhamento, padrões e sustentabilidade (conclui).

Publicações		Nº
gbXML – Green Building XML	(Maile, Fischer, Bazjanac, 2007; Dong et al., 2007; Kumar, 2008; Sanguinetti, Eastman, Augenbroe, 2009; Ferrari, Silva, Lima, 2010; Osello et al. 2011; Moon et al. 2011; Sokolov, Crosby, 2011; Martins, 2011; Eastman et al. 2011; Attia, 2011; Lam et al. 2012; Motawa, Carter, 2012; Aksamija, 2012; Martins, Silva, 2013; Asl, Zarrinmehr, Yan, 2013; Bahar et al. 2013; Díaz-Vilarinho, et al. 2014; Asl et al. 2014; Dong, O'Neill, 2014; Garcia, Zhu, 2015; Prada-Hernández et al. 2015; Ham, Golparvar-Fard, 2015; Kim, Woo, 2015; Asl et al. 2015; U.S. GSA, 2015; Kim et al. 2015; Choi et al. 2016; Abanda, Byers, 2016; Kuo et al. 2016; Arayici et al. 2017)	31
Interoperabilidade	(McGraw Hill, 2007; Dong et al., 2007; Bazjanac, Kiviniemi, 2007; Bazjanac, 2008; Sanguinetti, Eastman, Augenbroe, 2009; Shen et al. 2010; McGraw Hill, 2010; Ferrari, Silva, Lima, 2010; Osello et al. 2011; Martins, 2011; Eastman et al. 2011; Attia, 2011; Lam et al. 2012; Kim, Kim, Seo, 2012; Welle, Rogers, Fischer, 2012; Motawa, Carter, 2012; Aksamija, 2012; Martins, Silva, 2013; Asl, Zarrinmehr, Yan, 2013; O'donnell et al. 2013; Maile, O'donnell, Bazjanac, 2013; Bahar et al. 2013; Kota et al. 2014; Asl et al. 2014; Ahna et al. 2014; Dong, O'Neill, 2014; Garcia, Zhu, 2015; Prada-Hernández et al. 2015; Asl et al. 2015; U.S. GSA, 2015; Kim et al. 2015; Choi et al. 2016; Abanda, Byers, 2016; Kuo et al. 2016; Maltese et al. 2017 Chong, Lee, Wang, 2017; Beazley, Heffernan, Mccarthy, 2017; Arayici et al. 2017; El-Dirabya, Krijnenb, Papagelisc, 2017)	39

Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 9 apresenta o percentual de cada categoria relacionada individualmente com a Eficiência Energética, presente obrigatoriamente em todas as 52 publicações pesquisadas. As categorias Interoperabilidade e IFC foram as mais contempladas, no entanto, não significa que estão sempre interligadas.

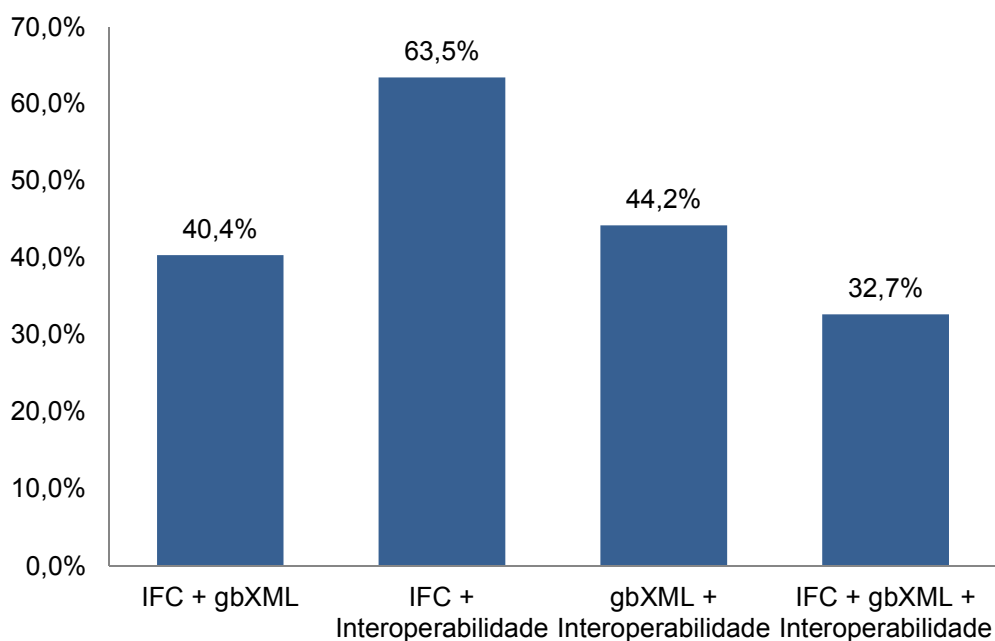
Figura 9: Percentual das categorias contempladas.



Fonte: Elaborado pelo autor

Quando a categoria Eficiência Energética é relacionada com duas ou mais categorias, é possível verificar que o IFC e a Interoperabilidade se sobressaem, contudo, não como quando tratadas individualmente. O principal destaque fica por conta da relação entre todas as categorias, sendo o menor percentual, o que evidencia o menor interesse (figura 10).

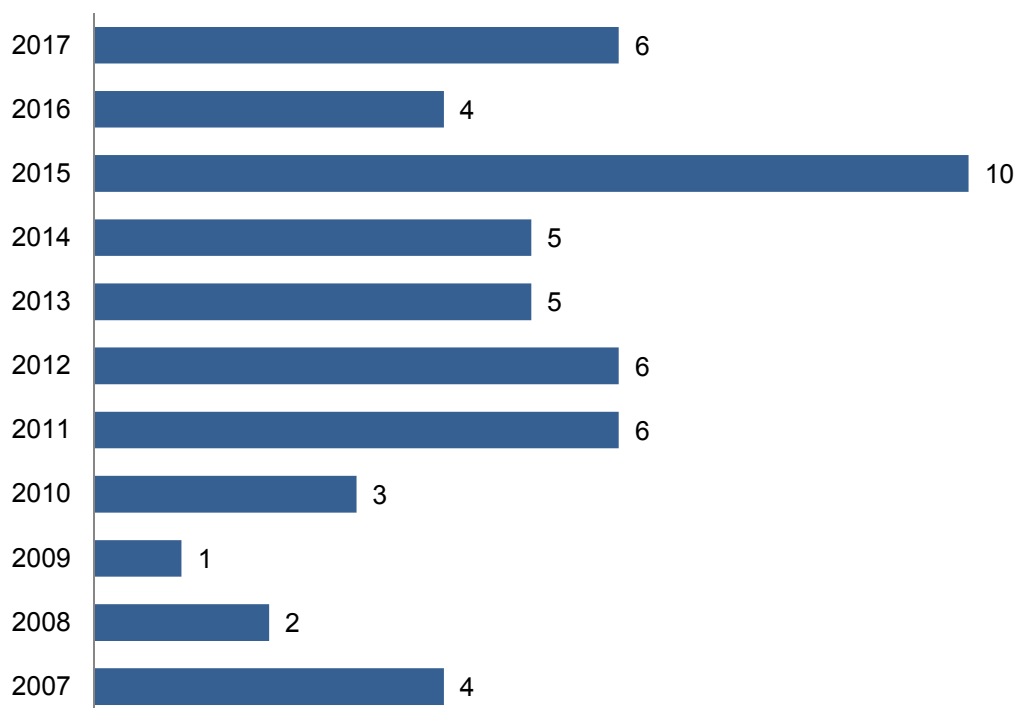
Figura 10: Percentual de duas ou mais categorias contempladas



Fonte: Elaborado pelo autor

Quando observada a distribuição do número de publicações no período definido para a pesquisa, que foi de 11 anos, verifica-se que em 2007 e entre os anos de 2011 e 2017 foram realizadas 36 publicações, correspondendo a 69,23% das 52 pesquisadas, variando entre 4 e 6 anuais. Já entre 2008 e 2010 este percentual foi de 11,54%, totalizando 6 publicações, ficando entre 1 e 3 anuais. O maior número de publicações anual foi registrado em 2010 com um total de 10, correspondendo a 19,23% (figura 11).

Figura 11: Publicações distribuídas nos anos



Fonte: Elaborado pelo autor

Os trabalhos confirmam que a busca pela eficiência energética através da utilização das ferramentas BEM em conjunto com as do BIM chegam de 73% no setor de AEC (McGRAW HILL, 2010). No entanto, há restrições e problemas nas simulações baseadas nos modelos BIM, como dificuldade de troca de dados e falta de informações (KIM et al. 2012; Anderson et al. 2013).

Embora o BIM tenha o potencial de ampliar a eficiência no processo de avaliação, a baixa interoperabilidade com as ferramentas de simulação de energia cria barreiras às avaliações energéticas (CHOI et al. 2016). As limitações ficam evidenciadas na forma como as ferramentas atendem às demandas de projeto, como a colaboração/integração e as análises de eficiência. No primeiro, as comunicações e interações ainda permanecem fora do ambiente BIM, o que pode causar distrações, atrasos no projeto e perder conhecimentos valiosos (contidos nessas interações). Em segundo lugar, a necessidade de engajar usuários finais e os interesses em selecionar recursos sustentáveis (EL-DIRABYA; KRIJNENB; PAPAGELISC, 2017).

A interoperabilidade de dados das ferramentas do BIM com pacotes de programas de avaliação de eficiência permanece incompleta, possibilitando avaliações

subjetivas de eficiência energética da edificação (AUGENBROE et al. 2003; Dong et al. 2007). A subjetividade destas avaliações é devido à ausência de um formato padrão e as diferentes estruturas de dados entre os software de análise, acarretando em orientações específicas deficientes, limitações na sincronização de dados e interfaces pouco amigável dos softwares (CRAWLEY et al., 2005, *apud* KIM; KIM; SEO, 2012). Há também o fato de que as informações que definem a edificação são geradas e geridas por diferentes programas que muitas vezes não possuem compartilhamento direto (OSELLO et al., 2011).

Os métodos tradicionais de análise energética podem causar certos problemas, tais como replicação de dados, vazamentos e armazenamento redundante (CHOI et al. 2016). Kim et al. 2016, observaram que as ferramentas atuais de modelagem BIM oferecem limitada opção de escolha de diferentes componente de construção, como paredes, pisos e telhados, no processo de modelagem da edificação voltada para simulação energética. No entanto, outros estudos demonstram que as ferramentas passaram das funções básicas de armazenar, vincular e trocar informações técnicas baseadas em projetos para cobrir toda análise de dados, de informações e conhecimento de todo o ciclo de vida da edificação, beneficiando todas as partes interessadas (MOTAWA, CARTER, 2013).

Ter uma ferramenta capaz de gerenciar critérios iniciais do projeto permite um projeto melhor e mais sustentável, com a possibilidade de avaliar dinamicamente cenários múltiplos, obter melhores resultados durante a construção e operação (MALTESE et al. 2017).

Moon et al. (2011) realizaram um estudo para investigar a interoperabilidade entre BIM e programas BEM, o modelo utilizado foi uma edificação de escritórios com dois andares, os resultados mostraram que cada programa BEM teve seus problemas de perda de informações em diferentes níveis. Além disso, as questões de interoperabilidade não estão limitadas apenas à utilização de diferentes programas, mas também dentro dos mesmos programas, quando as novas versões são liberadas.

Já Lam et al. (2012) notaram que um modelo desenvolvido em uma ferramenta do BIM possuía superfícies de piso independentes para as lajes de cada pavimento,

mas depois de compartilhado com o programa BEM, o eQUEST, as informações foram totalmente perdidas. No estudo, após análise detalhada, os autores identificaram lacunas referentes à interoperabilidade entre os programas, tais como distorções nas informações construtivas do modelo e perda de precisão geométrica.

Outro problema é o fluxo de dados entre os modelos BIM e as ferramentas de análise energética. Embora os dados da edificação possam ser exportados de um modelo BIM para uma ferramenta de simulação energética através do esquema IFC e gbXML, esse processo ainda tem algumas dificuldades no sentido oposto, se houver necessidade de modificar o modelo de construção para obter melhor desempenho de construção dentro das ferramentas BEM, sendo necessária a configuração manual nessas situações (FERRARI et al., 2010).

Constatou-se que a eficiência no processo de simulação de energia foi melhorada com a eliminação da inserção de dados manualmente, desta forma, as informações da edificação, como geometria e propriedades dos materiais, necessárias para a análise energética foram obtidas automaticamente do modelo BIM (KIM et al. 2016).

Martins e Silva (2013) entendem que a interoperabilidade entre as ferramentas do BIM e BEM de fato é significativamente incipiente, uma vez que necessitam ajustar os modelos das edificações quando inseridas nos programas de simulação energética e atualizá-los manualmente quando estes retornam à ferramenta do BIM após acertos e simulações realizados.

O BIM permite o compartilhamento de informações e sua reutilização através da interoperabilidade entre as suas ferramentas e as de simulação energética. Embora possa reduzir custos e tempo necessários para a modelagem de simulação de energia, nenhuma interface prática entre ferramentas do BIM e de análise de energia foi desenvolvida até o momento (AHNA et al. 2014).

A falta de interoperabilidade entre BIM e BEM provoca dificuldades no desenvolvimento e entrega de projetos que buscam desempenho energético sustentável, eficiente e boa durante todo o seu ciclo de vida (PRADA-HERNÁNDEZ et al., 2015).

De acordo com a FIATECH⁶ (200-) *apud* Shen *et al.* (2010), alguns dos principais problemas na interoperabilidade dos sistemas na indústria da AEC incluem:

- Dificuldade em acessar dados, informações e conhecimento precisos em tempo hábil em todas as fases do ciclo de vida do projeto de construção;
- Falta de interoperabilidade entre sistemas, com vários padrões concorrentes para gerenciamento de dados e informações dos projetos de construção;
- Planos e projetos são otimizados para um conjunto limitado de parâmetros;
- Falta de uma solução integrada que oferece todas as funcionalidades necessárias para o planejamento e gerenciamento de vários tipos de projetos;
- Os problemas do ciclo de vida não são bem compreendidos e, portanto, a modelagem e o planejamento não levam em conta todos os aspectos do ciclo de vida. A operação, a manutenção, o impacto ambiental e as questões de eliminação de fim de vida recebem consideração limitada na equação do planejamento do projeto.

Um modelo BIM compartilhado com IFC contém informações suficientes para a análise do desempenho energético da envoltória da edificação. Contém também informações referentes aos espaços delimitados pelas paredes e lajes (KIM *et al.* 2016).

No entanto, este compartilhamento através do esquema IFC necessita de substancial melhoria na tecnologia para que possa ser adotado plenamente na troca de informações do projeto (KAM; FISCHER 2004 e LEE *et al.* 2011). A literatura indica problemas técnicos específicos no compartilhamento de informações com base em IFC, como alteração geométrica, perda de informações do modelo, desordem na revisão interdisciplinar e o grande tamanho do arquivo IFC (KAM, FISCHER 2004; PAZLAR, TURK 2007 e 2008; LEE *et al.* 2011). Para Won; Lee (2011), e Zhang; Issa (2013), o tamanho do arquivo IFC dificulta tratar e compartilhar dados dos modelos criados nas ferramentas BIM.

⁶ A Fiatech é uma comunidade global que busca impulsionar melhorias de produtividade e eficiência através da adoção de práticas e tecnologias inovadoras no gerenciamento do ciclo de vida de ativos. Fonte: <http://www.fiatech.org/>, acesso em: março de 2017

A partilha de informação através do formato de arquivo IFC tem muitas restrições no projeto colaborativo. A perda de dados ocorre porque o intercâmbio de informações com base em formato IFC não fornece total interoperabilidade e, muitas vezes, a perda de dados resulta em diferenças estruturais entre o formato IFC e formato de dados do próprio programa ou diferenças nos mecanismos de conversão de dados, consequentemente, tem havido limitações no desenvolvimento de um ambiente de design colaborativo através do formato IFC (OH *et al.*, 2015).

Para suportar totalmente a troca de informações necessária para a análise de energia da edificação desenvolvida em BIM, o programa deve exportar o modelo para o arquivo gbXML e as ferramentas de simulação energética devem importar arquivos gbXML (SOKOLOV; CROSBY, 2011). No entanto, poucos programas BIM pode exportar os dados do edifício no esquema gbXML, e vários de simulação energética do edifício não importam os arquivos gbXML. Como resultado, os projetistas precisam verificar e modificar manualmente os modelos (US-GSA, 2015);

A versão atual do esquema gbXML (release 6.01 de 2015) somente é capaz de representar superfícies planas, (não suporta paredes curvas) mais precisamente, suporta apenas dois tipos de geometria de construção: polígono horizontal 3D e polígono retangular 2D. Assim, devido às representações limitadas e à exportação de funcionalidades relacionadas à construção de dados geométricos, o arquivo gbXML do modelo BIM, pode não incorporar formas assimétricas (HAM; GOLPARVAR-FARD 2015).

Os prós e contras na implementação do IFC e gbXML podem ser analisados a partir de dois aspectos (LAM *et al.*, 2012, p. 9):

O IFC adota uma abordagem abrangente e genérica para representar todo um projeto de construção, abarcando domínios, desde construção até operações de edifícios. A aplicação do gbXML atualmente é apenas voltada para simulação de energia. No entanto, o esquema gbXML pode ser estendido para determinados fins, como a simulação de iluminação. Em termos de geometria, a abordagem genérica da IFC tem a capacidade de representar qualquer forma de geometria da edificação, enquanto o gbXML somente aceita forma retangular, o que é suficiente para a simulação de energia;

O IFC usa uma abordagem "top-down", que resulta em um esquema de representação de dados relativamente complexo e arquivo de grande tamanho. O gbXML adota uma abordagem "bottom-up", que é flexível, de código aberto e um esquema de dados relativamente direto. A abordagem "top-down" pode rastrear todas as alterações de valor do elemento. Possui a capacidade de manter a integridade das informações automaticamente, no entanto, é muito complexa para ser implementado em programas. A abordagem "bottom-up" é menos complexa e provou ser bem sucedida na oferta de serviços de simulação baseados na web.

O formato IFC é mais interoperável com os programas ArchiCAD e Revit que gbXML, permitindo sua utilização não só com ferramentas de análise de energia, mas também com programas BIM, tornando-se mais eficaz do que gbXML em termos de interoperabilidade de dados de avaliações de desempenho energético ao longo de todo o ciclo de vida do edifício (KIM; KIM; SEO, 2012).

A vantagem do gbXML é o apoio recebido por empresas desenvolvedora de programas BIM e de simulação energética (MOON *et al.*, 2011). No entanto, o esquema IFC foi identificado como o sendo o único modelo de dados público, não proprietário e bem desenvolvido para edifícios e arquitetura (EASTMAN *et al.*, 2011).

Criar um modelo para simulação energética em ferramentas BIM demanda tempo, não é intuitivo e está propenso a erros (O'DONNELL *et al.* 2013). Informações armazenadas nos modelos BIM exigem algum tipo de tradução para transferência ao BEM, quando a modelagem de energia é para um edifício com geometria complexa, as inspeções manuais do modelo tornam-se necessárias e complexas (BAZJANAC, KIVINIEMI, 2007). Estudos de modelos de energia fundamentados em modelagem BIM necessitam de padrões ou diretrizes para reduzir os problemas de tradução de geometria do BIM para BEM (CLAYTON *et al.* 2013; MAILE, O'DONNELL, BAZJANAC, 2013). No entanto, a inclusão dos resultados das simulações na etapa de projeto não são óbvias (BAZJANAC, 2008).

Maile; Fischer; Bazjanac (2007, p. 36) identificaram seis etapas de um fluxo ideal de compartilhamento entre BIM e ferramentas de análise de energia:

(1) definir a localização do edifício e dados meteorológicos; (2) definir geometria, construções e materiais e tipos de ambientes; (3) atribuir os ambientes às zonas térmicas; (4) definir as cargas dos ambientes (ocupantes, eletrodomésticos, iluminação e demais equipamentos); (5) definir o sistema AVAC e componentes; e (6) a executar a simulação de energia.

Ao contrário do que é indicado por várias empresas desenvolvedoras de programas, o BIM e programas BEM não são plenamente interoperáveis, já que a transferência da geometria do edifício, que é o parâmetro de entrada de base para os programas BEM, é ainda deficiente. As visualizações de modelos analíticos de um edifício em BEM não são atualizadas automaticamente com mudanças no modelo BIM, portanto, devem ser feitas várias mudança, importação e exportação do modelo BIM para garantir que a geometria seja corretamente transferida. Além da geometria (parâmetro de entrada básica BIM) que não é corretamente lida pela ferramenta BEM, famílias de objetos não podem ser traduzidas corretamente em algumas outras variáveis analisadas pelo programa BEM (PRADA-HERNÁNDEZ *et al.*, 2015).

Com o aprimoramento das ferramentas de simulação de energia do edifício, espera-se que a interoperabilidade entre o BIM e as ferramentas de simulação de energia também evolua e melhore (BAHAR *et al.*, 2013). A aplicabilidade das simulações de energia baseadas nos modelos BIM na etapa inicial de projeto, as ferramentas precisam de uma intuitiva Interface Gráfica do Usuário, contínua troca de dados, confiável compatibilidade e capacidade de tradução automática das informações do BIM para o BEM (BAZJANAC, KIVINIEMI, 2007; ATTIA, 2011; AKSAMIJA, 2012; O'DONNELL *et al.* 2013).

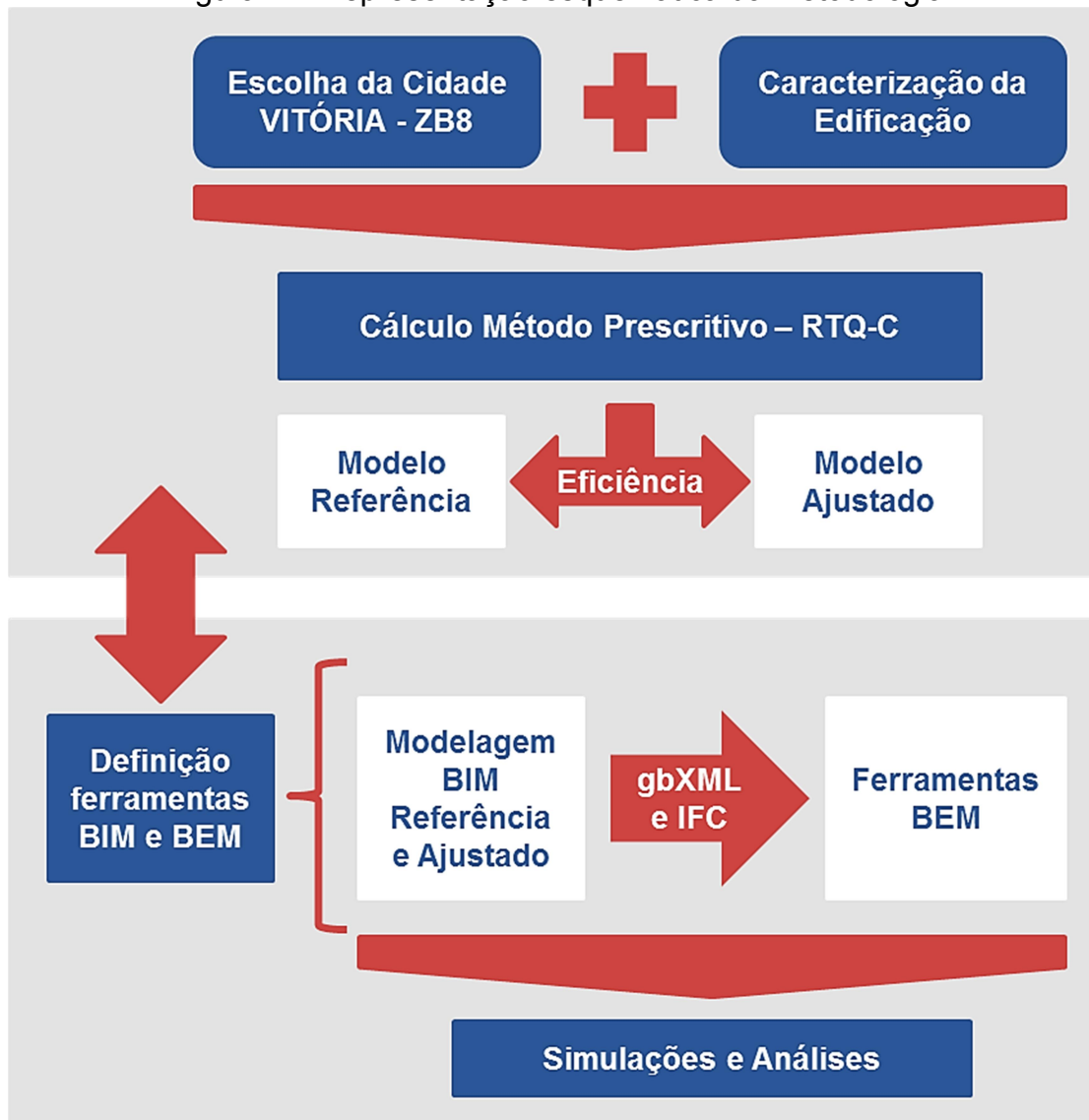
CAPÍTULO 3 – PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Vários estudos comprovam que a interoperabilidade entre ferramentas do BIM e BEM acarreta na perda de parte ou do todo das informações no modelo da edificação, tais como lajes, pisos e vedações verticais.

Desta forma, busca-se verificar o quanto a perda de informação no processo de compartilhamento influencia, ou se realmente influencia, no resultado de análise da eficiência energética da edificação com foco na envoltória, utilizando como referência o método prescritivo do PROCEL Edifica. A Figura 12 apresenta a representação esquemática da metodologia definida para a realização da pesquisa.

Figura 12: Representação esquemática da metodologia

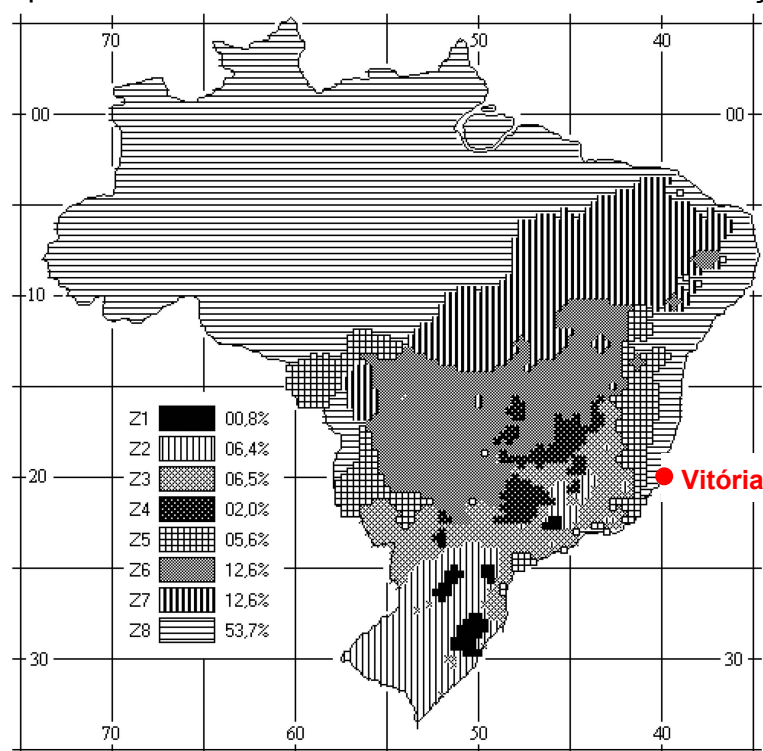


Fonte: Elaborado pelo autor

3.1. SELEÇÃO DA CIDADE

A escolha de Vitória, capital do Espírito Santo, para a realização deste trabalho foi motivada, principalmente, pelo fato de ser a cidade que abriga a Instituição de Ensino que idealizou a pesquisa. Importante também é o fato da cidade estar inserida na Zona Bioclimática 8 descrita na NBR 15220-3 (ABNT, 2005c), zoneamento este distribuído por uma área representativa do território nacional, conforme ilustra a figura 13.

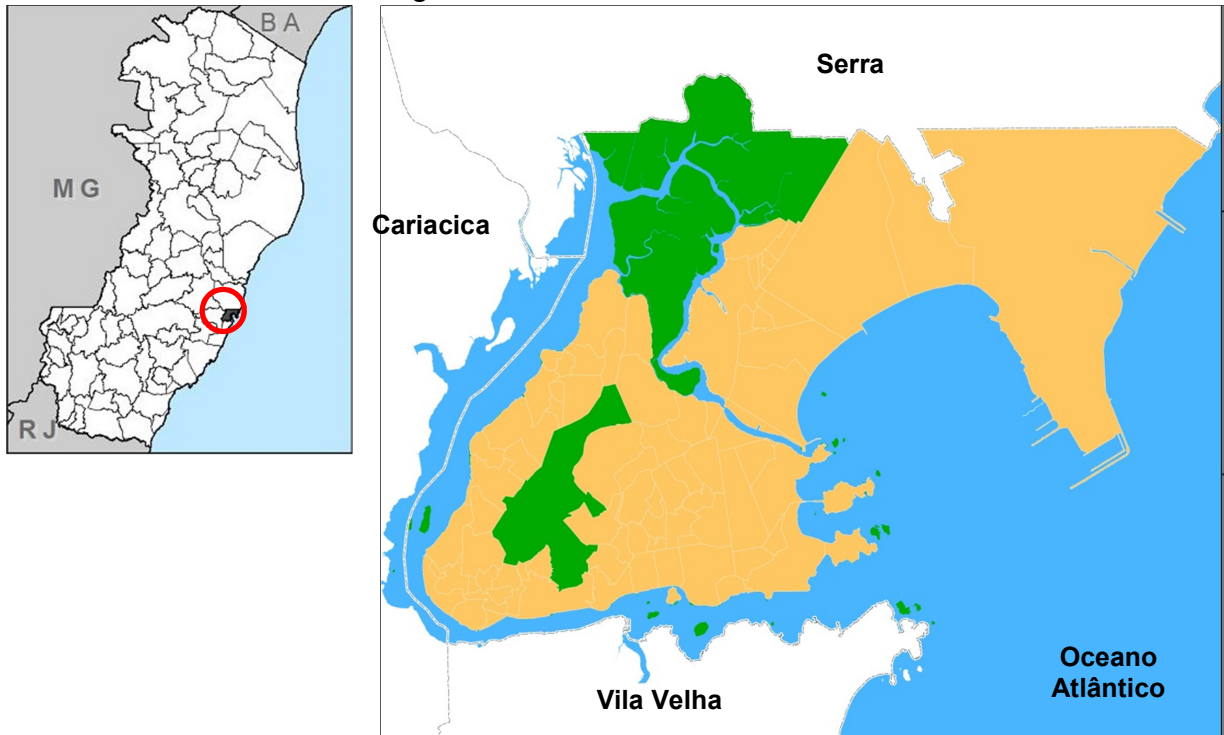
Figura 13: Mapa do Zoneamento Bioclimático do Brasil e localização de Vitória



Fonte: ABNT 2003b, adaptado pelo autor.

Vitória está localizada no litoral da região Sudeste (figura 14), no Estado do Espírito Santo, com coordenadas 20° 16' (20,26 UTM) de latitude e 40° 17' (40,28 UTM) de longitude. Suas fronteiras são a leste com o Oceano Atlântico, ao norte com o Município da Serra, a oeste com o Município de Cariacica e ao sul com o Município de Vila Velha, separados pela Baía de Vitória.

Figura 14: Vitória e seus limites



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO REFERÊNCIA

A pesquisa realizada por Lamberts, Ghisi e Ramos (2006), junto com as pesquisas de Bernabé (2012), Santos (2012), Casagrande (2013) e Maioli (2014), estas últimas desenvolvidas no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFES, são referências para a construção do modelo de edifício comercial representativo desta pesquisa.

O modelo referência proposto nesta pesquisa é um edifício de uso comercial, com tipologia e características comuns aos edifícios construídos em todo território nacional, comprovado por Lamberts, Ghisi e Ramos (2006, p. 44).

[...] verifica-se a homogeneidade entre as tipologias das edificações em todo país, ou seja, um mesmo modelo de edifício recebe as solicitações para o clima da região sul (inverno frio) e do norte do país (inverno e verão quentes), tornando-se claro o baixo desempenho térmico destas edificações.

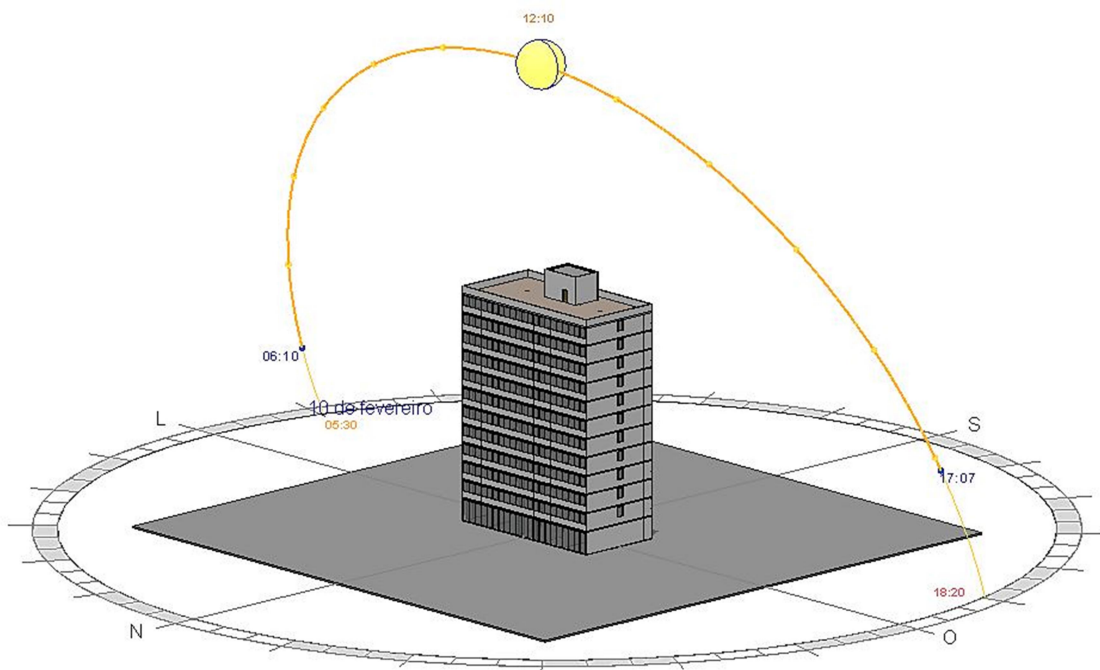
A edificação padrão possui como característica arquitetônica principal para a envoltória vertical as maiores fachadas com 50% da área envidraçada e orientação norte/sul (figuras 15 e 16).

Figura 15: Modelo com 50% da fachada envidraçada



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 16: Modelo fachada 50% Norte/Sul



Fonte: Elaborado pelo autor

O quadro 13 resume as principais características construtivas do edifício e o quadro 14 apresenta o padrão de uso, ocupação e equipamentos do edifício.

Quadro 13: Características construtivas do edifício

Variável	Valor	Justificativa
Gabarito	11 pavimentos	Altura utilizada por Casagrande (2013) e Lamberts, Ghisi e Ramos (2006) relatam que 40% das edificações pesquisadas possuíam 11 pavimentos.
Forma da planta	Retangular	Grande incidência de edifícios com formato retangular (LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006). Utilizada por Bernabé (2012), Santos (2012), Casagrande (2013) e Maioli (2014).
Dimensões da planta	15x30m	Dimensões utilizadas por Bernabé (2012), Santos (2012), Casagrande (2013) e Maioli (2014).
Pé direito livre	3,00m	Medida utilizada na pesquisa Bernabé (2012) e Casagrande (2013).
Salas por pavimento	11	Divisão definido pelo autor tendo como base o critério utilizado por Bernabé (2012), Casagrande (2013) e Maioli (2014) que foi de 12 salas.
Proteção Solar	Sem proteção	Lamberts, Ghisi e Ramos (2006) ressaltam a baixa utilização de brises, ou qualquer outro elemento sombreador das aberturas ou parte delas. Seguidos por Bernabé (2012).
Componente das paredes	Bloco cerâmico, 6 furos, 15cm	Lamberts, Ghisi e Ramos (2006) relatam que todos os edifícios foram construídos com paredes externas de tijolo cerâmico. Utilizada por Bernabé (2012) e Casagrande (2013).
Refletância dos componentes opacos das fachadas	0,6	Lamberts, Ghisi e Ramos (2006) relatam que em 45% dos edifícios pesquisados a refletância da fachada é entre 0,5 e 0,7. Utilizado por Bernabé (2012), Casagrande (2013) e Maioli (2014).
Cobertura	Laje de 10 cm	Lamberts, Ghisi e Ramos (2006) descrevem que a maioria das edificações apresenta cobertura com laje impermeabilizada sem proteção. Característica adotada por Bernabé (2012) e Santos (2012).
Vidros	6mm, transparente	Conforme observado por Lamberts, Ghisi e Ramos (2006) nas edificações pesquisadas. Utilizado também por Casagrande (2013).
PAF	≤ 50%	Lamberts, Ghisi e Ramos (2006) constataram que 40% das edificações apresentam PAF menor que 50%, e 60% possuem um PAF superior a este valor. Utilizado também por Bernabé (2012), Santos (2012), Casagrande (2013) e Maioli (2014).

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 14: Padrão de uso, ocupação e equipamentos do edifício.

Variável	Valores/Parâmetros	Justificativa
Tipo de atividade Escritório:	Escritório: leve Fator Metabólico: 0,9	Segundo Lamberts; Ghisi; Ramos, (2006) grande parte das salas comerciais são destinadas ao desenvolvimento vinculadas às áreas de odontologia, advocacia e contabilidade. Características também utilizadas por Bernabé (2012) e Santos (2012)
Horário de funcionamento	Ocupação total: 8h às 12h e 14h às 18h Ocupação reduzida para 50%: 12h às 14h	Horários utilizados por Bernabé (2012), Santos (2012) e Maioli (2014)
Densidade de ocupação	0,14 pessoas/m ² ou 1 pessoa/7,15 m ²	Ocupação utilizada por Bernabé (2012)
Carga de iluminação	20 W/m ²	Utilizado por Santos (2012) e Maioli (2014)
Carga dos equipamentos	10 W/m ²	Utilizado por Santos (2012).
Temperatura de Controle	24°C	Temperatura limite para acionamento do sistema de ar condicionado, sem aquecimento no período do inverno, conforme prática comum adotada no Brasil (GHISI; TINKER, 2005). Utilizado por Bernabé (2012) e Santos (2012).
Nível de iluminação de referência	500 lx	Valor recomendado pela NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013) para ambientes de escritório para realização de tarefas como escrever, teclar, ler, processar dados etc. Valor utilizado por Bernabé (2012), Santos (2012) e Maioli (2014).
Sistema de acionamento da iluminação artificial	Interruptores convencionais de dois passos	Conforme especificado por Santos (2012). É comumente adotado em edifícios comerciais. Utilizado por Maioli (2014).
UR de controle	Entre 40% e 60%	Segundo a NBR 16401 (ABNT, 2008). Utilizado por Bernabé (2012) e Santos (2012).
Sistema de ar condicionado ⁷	Split piso-teto sem renovação de ar.	Sistema adotado por Bernabé (2012) e Santos (2012) com característica: Capacidade de Refrigeração de 48.000 (Btu/h); Eficiência Energética de 3,2 (W/W) e Consumo: 92,1(kWh/mês)

Fonte: Elaborado pelo autor

⁷ O modelo comercial de 48.000Btu/h homologado pelo INMETRO e o Programa Brasileiro de Etiquetagem correspondente possui Eficiência Energética de 3,05 W/W, Consumo de 96,8 kWh/mês e Potência Elétrica de 4.610W. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/condicionadores_ar_piso-teto_indicenovo.pdf.

Para que o edifício obtenha a classificação nível A no RTQ-C para obtenção do ENCE parcial, os pré-requisitos específicos à envoltória devem ser observados e atendidos. O RTQ-C define valores para a transmitância térmica de paredes e coberturas de acordo com as Zonas Bioclimáticas definidas na NBR 15220-3 (ABNT, 2005c). Na tabela 11 são exibidos os limites de transmitância para a cidade de Vitória/ES.

Tabela 11: Limite de transmitância térmica, pré-requisito para classificação no nível A do RTQ-C.

Região	Cidade	Zona Bioclimática (NBR 15220-3)	Transmitância Térmica de Paredes Externas	Transmitância Térmica de Coberturas
SE	Vitória – ES	8	$\leq 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ paredes com capacidade térmica $\leq 80 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ e $\leq 3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ paredes com capacidade térmica $\geq 80 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	$\leq 1,00 \text{ W/m}^2\text{K}$ para ambiente climatizado

Fonte: PROCEL 2016, adaptado pelo autor.

A transmitância térmica das paredes externas é exigida apenas nos pré-requisitos do regulamento, pois a variabilidade nos resultados das simulações com diferentes transmitâncias não pode ser descrita em uma equação de regressão linear. Portanto, a transmitância das paredes externas não será parâmetro variável e atenderá aos limites estabelecidos pelo RTQ-C (CARLO, 2008).

3.2.1. Definição dos parâmetros de controle e as variáveis para as simulações

Para a elaboração das simulações o RTQ-C exige um modelo referência e os propostos com as soluções para atingir o ENCE Nível A. Contudo, as simulações desta pesquisa não visam solucionar questões de uma edificação existente ou futura, sendo então elaborados somente modelos propostos e as referências serão os cálculos do método prescritivo para envoltória.

Desta forma, o Quadro 15 apresenta os parâmetros constantes dos modelos e que foram apresentados nos Quadros 13 e 14.

Quadro 15: Parâmetros de controle constantes

Parâmetros de Controle	
Características arquitetônicas	Percentual de Abertura na Fachada (PAF)
	Gabarito
	Dimensões da planta
	Planta baixa tipo
	Pé direito
	Transmitância dos componentes opacos
	Proteção Solar
Características uso e ocupação	Tipo de atividade
	Densidade de ocupação
	Carga de iluminação
	Nível de iluminação
	Carga de equipamentos
	Temperatura de controle
	Sistema de ar condicionado

Fonte: Elaborado pelo autor

As esquadrias são componentes importantes da envoltória, com o Fator Solar dos vidros uma variável que influencia diretamente no Índice de Consumo da Envoltória (IC_{env}). Em conjunto com a cobertura e a alvenaria, são as variáveis dos modelos que definem a classificação final da edificação no PROCEL Edifica.

Desta forma, o quadro 16 agrupa as variáveis de teste e seus parâmetros para cada modelo proposto.

Quadro 16: Parâmetros variáveis dos modelos

Variáveis de teste	Modelo Referência	Modelo Ajustado
Fator Solar vidros das esquadrias	Esquadria simples com vidro 6mm translúcido	Esquadria simples com vidro 6mm reflexivo - 20% aço inoxidável vidro claro
Componentes das paredes	Alvenaria 14 cm (Bloco cerâmico de 6 furos – 9x14x24cm; Reboco de 2,5cm)	Alvenaria 14 cm (Bloco concreto de 2 furos – 9x19x39cm; Reboco de 2,5cm)
Componentes da Cobertura	Laje simples, concreto de 10 cm.	Telhado vegetado ⁸ (Laje maciça 10 cm com manta betuminosa, proteção mecânica, terra argilosa seca (40cm) e vegetação)

Fonte: Elaborado pelo autor

⁸ Para o telhado vegetado a absorvância possui valor teórico de 0,25 conforme Nota Técnica n.9 – Consideração sobre absorvância de coberturas com aplicação de teto jardim. RTQ-C, 12/01/2015. (PROCEL, 2016)

Para o Modelo Referência as variáveis possuem as características construtivas da edificação conforme determinadas no quadro 13. Já o modelo Ajustado teve as variáveis Fator Solar, Paredes e Cobertura adequadas de modo que a edificação obtenha a classificação máxima.

As tipologias construtivas das alvenarias e das coberturas adotadas na pesquisa estão disponíveis no Anexo V do Manual para Aplicação do RAC (PROCEL, 2013). Com as variáveis de teste definidas, foram realizados os cálculos pelo método prescritivo para a confirmação da classificação final do nível energético da envoltória de cada modelo.

3.3. PROGRAMAS DE MODELAGEM E ANÁLISE DE EFICIÊNCIA

Os programas selecionados para desenvolver a modelagem (BIM) e análise de eficiência energética (BEM) dos modelos das edificações, definidos para a pesquisa, precisaram atender aos seguintes requisitos:

- Possibilidade de interoperabilidade mínima IFC e gbXML;
- Ferramenta difundida e utilizada em pesquisa de análise de eficiência energética de edificações⁹;
- Interface amigável, conhecida e dominada;
- Disponibilidade de versão educacional sem custo ou com licença educacional.

As ferramentas de simulação energética têm sido largamente utilizadas na educação e também na indústria. No setor industrial são destaques o DesignBuilder, DOE-2, eQUEST, EnergyPlus, Green Building Studio, e IES-VE, já para o educacional são o Energy-10, Radiance, CONTAM e eQUEST os mais utilizados (HABERL, 2008; ATTIA et al. 2009).

Conforme levantamento realizado por Bernabé (2012) o *EnergyPlus* foi adotado como ferramenta de desempenho energético para edificações em 8 de 13 publicações relevantes na área de eficiência energética no Brasil entre os anos de 1995 e 2008.

⁹ Artigos pesquisados na base de dados *ScienceDirect*, *IBPSA* e outros semelhantes.

Em pesquisa realizada na base de dados do *ScienceDirect*, através do Portal Periódicos da CAPES entre os anos de 2014 e 2016, com as palavras chaves *BIM* e *Analysis Energy Efficiency*, no período de 2010 a 2016, surgiram 143 artigos relacionados, dentre estes, 43 efetivamente utilizaram o Autodesk Revit para modelagem e 15 o *EnergyPlus* para análise de eficiência energética da edificação modelada. Ambos serão utilizados para a modelagem BIM e como motor dos programas BEM, respectivamente.

Vários autores têm verificado a interoperabilidade entre o BIM e as ferramentas de análise de desempenho energético (BEM), e demonstram os principais padrões utilizados para o compartilhamento das informações. O quadro 17 apresenta os programas BEM, e suas versões, que atendem ao requisito de compartilhamento definido e foram selecionados para a pesquisa, assim como, os autores que comprovam a interoperabilidade em suas pesquisas.

Quadro 17: Autores que pesquisaram os padrões de referência utilizados pelos programas de simulação para interoperabilidade (continua)

Programa	Padrões de Interoperabilidade				Autores
	IFC	gbXML	IDF	INP	
EnergyPlus - 8.5 (interface OpenStudio - 1.12)	X	X	X		<ul style="list-style-type: none"> - Moon, Choi, Kim, Ryu, (2011); - Hernández, Quintero, Borda, Tienda, (2015); - Maile, Fischer, Bazjanac, (2007); - Garcia, Zhu, (2015); - Kim, Kim, Seo, (2012); - Cho, Chen, Woo, (2011); - Motawa, Carter, (2013); - Kim, Jeong, Clayton, Haberl, Yan, (2015).
eQUEST - 3.65				X	<ul style="list-style-type: none"> - Moon, Choi, Kim, Ryu, (2011); - Hernández, Quintero, Borda, Tienda, (2015); - Maile, Fischer, Bazjanac, (2007); - Garcia, Zhu, (2015); - Dubois, Horvat, (2010).
IES Virtual Environment - 2017	X	X			<ul style="list-style-type: none"> - Moon, Choi, Kim, Ryu, (2011); - Hernández, Quintero, Borda, Tienda, (2015); - Kim, Kim, Seo, (2012); - Cho, Chen, Woo, (2011); - Motawa, Carter, (2013).
Design Builder - v5		X			<ul style="list-style-type: none"> - Hernández, Quintero, Borda, Tienda, (2015); - Maile, Fischer, Bazjanac, (2007); - Kim, Jeong, Clayton, Haberl, Yan, (2015).

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 17: Autores que pesquisaram os padrões de referência utilizados pelos programas de simulação para interoperabilidade (conclui)

Programa	Padrões de Interoperabilidade				Autores
	IFC	gbXML	IDF	INP	
Green Building Studio		X			<ul style="list-style-type: none"> - Hernández, Quintero, Borda, Tienda, (2015); - Maile, Fischer, Bazjanac, (2007); - Garcia, Zhu, (2015); - Kim, Kim, Seo, (2012); - Asl, Zarrinmehra, Berginb, Yan, (2015).

Fonte: Elaborado pelo autor

A ferramenta do BIM definida para esta pesquisa é o Autodesk Revit Architecture 2017. O programa atende a todos os requisitos apresentados: domínio da ferramenta; licença gratuita ou educacional e interoperabilidade com os programa BEM através dos esquemas IFC e gbXML. Para o esquema IFC o Autodesk Revit possui 9 versões distintas, sendo definidas duas – IFC 2x3 e IFC 4, e para o esquema gbXML são 2 métodos, sendo utilizada a “Configurações de Energia”. O quadro 18 apresenta as opções de exportação desta pesquisa para cada esquema.

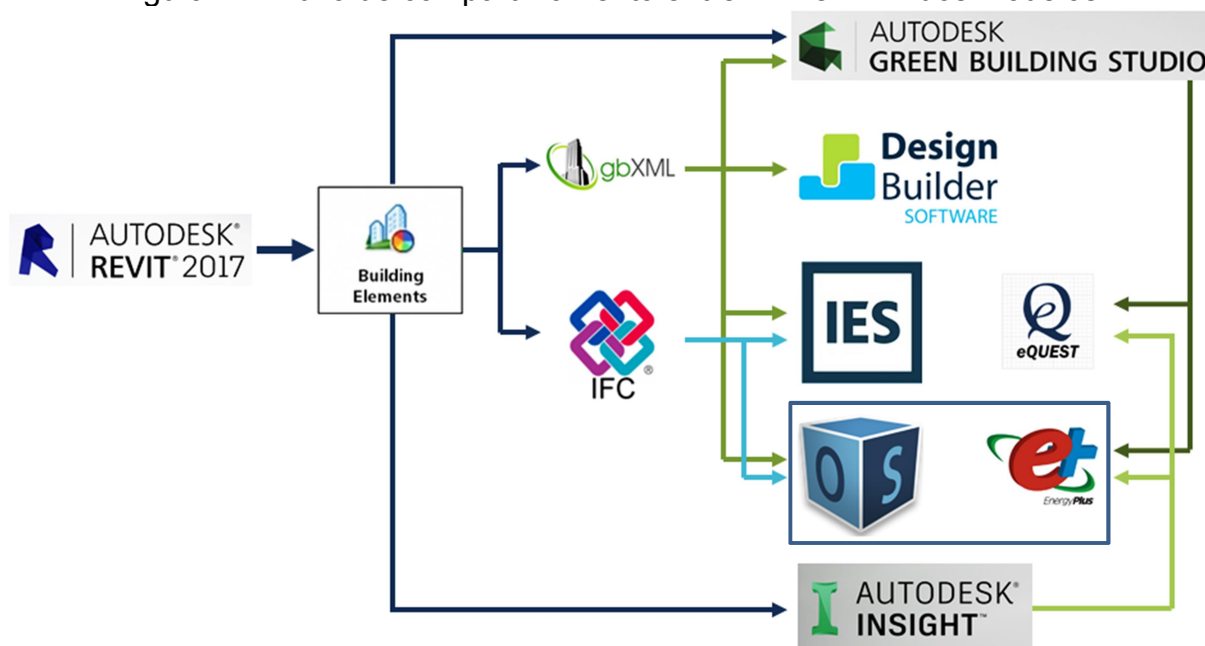
Quadro 18: Características dos esquemas IFC e gbXML utilizados

Versões/Métodos		Características
IFC	Vista de coordenação IFC 2x3 2.0	A versão certificada padrão da exportação, normalmente suportadas por outros sistemas, com base no esquema IFC 2x3 e na definição da vista do modelo Coordination View 2.0.
	Vista de referência IFC4	A versão mais recente do IFC, criado como um modelo de referência que não será modificado. Define subconjunto padronizado do esquema IFC4 particularmente adequado para todos os fluxos de trabalho BIM baseados em modelos de referência, com troca principalmente unidirecional. As modificações dos dados do BIM, principalmente da representação da forma, são tratadas pelo autor original.
gbXML	Configurações de energia	Permite exportar o modelo analítico de energia criado pelo Revit, sendo composto pelos espaços analíticos e pelas superfícies analíticas, criados com base nos parâmetros definidos no item Configurações de Energia. Os dados exportados fornecem um modelo de energia preciso para análise, sendo mais preciso.

Fonte: Autodesk 2017 e buildingSMART 2015, adaptado pelo autor

Definidas as versões de IFC e os métodos gbXML que serão exportados os modelos do Autodesk Revit, e tendo conhecimento dos padrões de interoperabilidade que as ferramentas BEM escolhidas possuem, a figura 17 mostra o fluxo de compartilhamento dos modelos entre as ferramentas para a execução das simulações.

Figura 17: Fluxo de compartilhamento entre BIM e BEM dos modelos



Fonte: Elaborado pelo autor

Certas ferramentas de simulação possuem conectividade com ferramenta do BIM por meio de complementos (plug-ins) ou comandos, como é o caso do Autodesk Insight e o Green Building Studio (GBS), que possibilitam a simulação diretamente na interface BIM. Nesta formato de interoperabilidade, ambos realizam a simulação energética em um ambiente virtual baseado na web, através de um servidor hospedado na nuvem, a partir de modelos energéticos derivados diretamente dos modelos de edificações elaborados no Autodesk Revit.

A grande maioria dessas ferramentas utiliza como motores de análise de desempenho o *EnergyPlus* e o *DOE 2*, ambos desenvolvidos pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL) junto com o *US-Department of Energy*. No entanto, há programas BEM que utilizam motor de análise próprio.

Tanto o *EnergyPlus* quanto o *DOE 2* não possuem interface gráfica amigável, dificultando o processo de modelagem. Desta forma, possuem integração com ferramentas BEM de interface gráfica mais amigável para o usuário. O quadro 19 apresenta os motores de simulação e as características dos programas.

Quadro 19: Motores de simulação e características principais dos programas

Programa	Motor	Características
EnergyPlus - 8.5 (interface OpenStudio - 1.12)	EnergyPlus	<ul style="list-style-type: none"> – Ferramenta de análise energética e de simulação de carga térmica, não fornece interface direta com o sistema BIM e necessita de outros programas como o DesignBuilder (MOON, CHOI, KIM, RYU, 2011); – Pode ser usado para calcular o consumo de energia utilizando dados de tempo através de simulações anuais e também para analisar sistemas de AVAC, balanço de cargas térmicas, fluxo de calor multizonas e luz solar natural (KIM, KIM, SEO, 2012); – Flexibilidade na definição de sistemas AVAC e permite a simulação de sistemas múltiplos de AVAC para uma única zona (CHO, CHEN, WOO, 2011).
eQUEST - 3.65	DOE-2	<ul style="list-style-type: none"> – Combina assistente para a criação da edificação com a de avaliação da eficiência energética (BEM), e relatórios gráficos. Não importa arquivo gbXML diretamente, usa o Green Building Studio (GBS) (MOON, CHOI, KIM, RYU, 2011); – Desenvolvido para uso durante as várias fases de concepção de um projeto de construção, fornece dois assistentes de projeto, o Schematic Design (SDW) e o Design Development Wizards (DDW), que podem ser usados para simplificar a entrada de dados, através do uso de parâmetros. Realiza simulação para análise de eficiência energética e AVAC. Importa formato DWG e gbXML (MAILE, FISCHER, BAZJANAC, 2007).
IES Virtual Environment - 2017	ApacheSIM	<ul style="list-style-type: none"> – Sistema integrado que gera simulações a partir do modelo principal. Possui ferramentas de análise térmica, planejamento de custos, análise de ciclo de vida, análise do fluxo de ar, iluminação e segurança dos ocupantes. Importa arquivo gbXML (MOON, CHOI, KIM, RYU, 2011); – Conjunto integrado de programas para construção aplicados na análise de energia, possui modelagem própria e funções de análise de perda e ganho de calor, luz solar natural e climatização, importa arquivos gbXML (KIM, KIM, SEO, 2012); – Emissão de relatórios e definição parâmetros de projeto, realiza análises de Dinâmica de Fluidos Computacionais – CFD e Análise de Ciclo de Vida – LCA (CHO, CHEN, WOO, 2011).
Design Builder - v5	EnergyPlus	<ul style="list-style-type: none"> – Ferramenta para avaliação de opções de fachadas, análise de iluminação natural, visualização de layouts de sites e proteção solar, simulação térmica da ventilação natural, e dimensionamento de equipamentos e sistemas AVAC. É desenvolvida para ser usada em apoio de todas as fases do processo de projeto, também suporta importação de "dados de pesquisa" recolhidos de edifícios existentes. Suporta somente definições de sistema de climatização compacto (MAILE, FISCHER, BAZJANAC, 2007).
Green Building Studio	DOE-2	<ul style="list-style-type: none"> – Ferramenta de análise de energia baseada na Web, permite carregamento de arquivo gbXML (Green Building Extensible Markup Language) para análises de simulação de energia, gráficos com os resultados da análise podem ser gerados (GARCIA, ZHU, 2015).
Plug-in: Green Building Studio e Insight	DOE-2	<ul style="list-style-type: none"> – Ferramentas de análise de energia baseada na Web que, por intermédio dos plug-ins, permite comunicação direta com o Revit para análises de simulação de energia, gráficos com os resultados da análise podem ser gerados.

Fonte: Elaborado pelo autor

Como exigido pelo RTQ-C, os programas devem ser aprovados pelo método BESTEST da ANSI/ASHRAE Standard 140. Para isso precisam atender diretrizes específicas, como: modelar de hora em hora para os 365 dias do ano; permitir multizonas térmicas; variações horárias de ocupação, potência de iluminação e equipamentos separadamente para os dias das semanas. O quadro 20 apresentam os programas BEM e suas aprovações ASHRAE Standard 140.

Quadro 20: Programas BEM aprovados na ASHRAE 140

Programa	Motor	ANSI/ASHRAE Standard 140
EnergyPlus (Interface OpenStudio)	EnergyPlus	ANSI/ASHRAE Standard 140-2011 – Teste da Carga Térmica da Envolória e Estrutura do Edifício (HENNINGER e WITTE, 2012).
eQUEST	DOE-2	ANSI/ASHRAE Standard 140-2011 – Teste da Carga Térmica da Envolória e Estrutura do Edifício (JUDKOFF e NEYMARK, 2013).
IES Virtual Environment	ApacheSIM	ANSI/ASHRAE Standard 140-2011 – Teste da Carga Térmica da Envolória e Estrutura do Edifício (JUDKOFF e NEYMARK, 2013).
Design Builder	EnergyPlus	ANSI/ASHRAE Standard 140-2011 – Teste da Carga Térmica da Envolória e Estrutura do Edifício (HENNINGER e WITTE, 2012).
Green Building Studio	DOE-2	ANSI/ASHRAE Standard 140-2011 – Teste da Carga Térmica da Envolória e Estrutura do Edifício (JUDKOFF e NEYMARK, 2013).
Insight	DOE-2	ANSI/ASHRAE Standard 140-2011 – Teste da Carga Térmica da Envolória e Estrutura do Edifício (JUDKOFF e NEYMARK, 2013).

Fonte: Elaborado pelo autor

Definidas as ferramentas do BIM e BEM que serão utilizadas, passa-se para os cálculos do método prescritivo com intuito de verificar qual a classificação que o modelo Referência se enquadra. Caso o modelo referência não alcance o nível A de eficiência energética, sofrerá alterações nos componentes da envoltória para que atinja a classificação desejada e constatada através dos novos cálculos do método prescritivo.

CAPÍTULO 4 – CÁLCULO SEGUNDO MÉTODO PRESCRITIVO: CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS

4. CÁLCULO SEGUNDO MÉTODO PRESCRITIVO – CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS

O Modelo Referência foi o primeiro a ter a sua classificação energética calculada para verificar a qual nível que enquadra. Posteriormente, foram realizadas as alterações das variáveis de testes previamente definidas para o Modelo Ajustado e realizados os cálculos para descobrir a qual nível de eficiência alcançou.

As equações utilizadas nos cálculos da resistência térmica (R) e transmitância térmica (U) atendem à norma ASHRAE Handbook – Fundamental de 2013, já que a ferramenta de modelagem BIM escolhida, o Autodesk® Revit® Architectural 2017, segue esta metodologia para inserção, entendimento e cálculo destas propriedades na composição da envoltória dos modelos. No entanto, os valores utilizados em todos os cálculos do método prescritivo atendem à NBR 15220-2 (ABNT, 2003).

Os dois modelos possuem características físicas idênticas como as dimensões (altura, largura e profundidade) e número de pavimentos. Na tabela 12 estão os componentes da envoltória – vidros, paredes e cobertura, que os diferenciam.

Tabela 12: Característica da Edificação Padrão

Item	Dimensões (m)				Área (m²)	Quant./ Níveis
	L	A	C	e		
Laje Térreo	15,00		30,00		450,00	1
Laje Tipo	15,00		30,00		450,00	11
Laje Cobertura	-		-		450,00	1
Fachada Norte	30,00	40,90		0,14	1.227,00	1
Fachada Sul	30,00	40,90		0,14	1.227,00	1
Fachada Leste	15,00	40,90		0,14	613,50	1
Fachada Oeste	15,00	40,90		0,14	613,50	1
Pé Direito Térreo		4,00				1
Pé Direito Tipo		3,20				11

Fonte: Elaborada pelo autor

Com as informações levantadas foram calculadas a área total construída, a área de projeção, a área da envoltória e o volume (tabela 13). São dados necessários para definir o Fator Forma (FF) e o Fator Altura (FA), variáveis da equação do indicador de consumo da envoltória (IC_{env}).

Tabela 13: Dados para Cálculo do FF e FA

Item	Volume e Área
Volume do Edifício - V_{tot}	17.640,00 m ³
Área de projeção do edifício - A_{pe}	450,00 m ²
Área de projeção da cobertura - A_{Pcob}	450,00 m ²
Área total Construída - A_{tot}	5.400,00 m ²
Área da Envoltória - A_{env}	3.681,00 m ²

Fonte: Elaborada pelo autor

A área de projeção da edificação (A_{pe}) define qual das equações será utilizada no cálculo do indicador de consumo da envoltória (IC_{env}), presentes no RTQ-C. Como a A_{pe} é idêntica para os três modelos, a equação e o limite (Fator de Forma máximo – $FF_{máx}$) são:

$$A_{pe} \leq 500m^2$$

Limite: Fator de forma máximo ($FF_{máx}$) = 0,48

Equação 2:

$$IC_{env} = 454,47.FA - 1641,37.FF + 33,47.PAF_T + 7,06.FS + 0,31.AVS - 0,29.AHS - 1,27.PAF_T.AVS + 0,33.PAF_T.AHS + 718$$

Para o cálculo do Percentual de Abertura da Fachada (PAF_T) é necessário quantificar as esquadrias e determinar as áreas dos montantes e dos vidros (tabela 14).

Tabela 14: Esquadrias utilizadas no modelo

Tipo	Esquadrias Completas			Vidros		
	Quant.	Área esquadria (m ²)	Área Total (m ²)	Quant.	Área por esquadria (m ²)	Área Total (m ²)
(J1) - Janela Lateral Oeste	11	1,80	19,80	11	1,44	15,86
(J2) - Janela Lateral Leste	11	1,80	19,80	11	1,44	15,86
(J3) - Janela Salas Norte	77	6,00	462,00	308	1,25	385,37
(J4) - Janela Salas Sul	22	7,50	165,00	88	1,59	140,03
(J5) - Janela Salas Sul	22	8,70	191,40	88	1,86	163,96
(J6) - Pele Vidro Térreo Norte	2	17,50	35,00	8	3,93	31,45
(J7) - Pele Vidro Térreo Norte	2	20,30	40,60	8	4,60	36,83
(J8) - Pele Vidro Térreo Norte	1	23,80	23,80	4	5,44	21,77
(J9) - Janela AT Sul	11	10,50	115,50	44	2,27	99,93

Fonte: Elaborada pelo autor

Em relação às esquadrias o Autodesk Revit 2017 disponibiliza diferentes modelos de já pré-definidos, retirados da norma ASHRAE Handbook – Fundamental. Desta forma o fator solar (FS) dos vidros utilizado no cálculo do IC_{env} seguiram os padrões da ASHRAE e variam entre os modelos.

Após o levantamento foi possível calcular todas as variáveis presentes na equação do IC_{env} , como a edificação é a mesma para os dois modelos, os resultados foram condensados na tabela 15.

Tabela 15: Dados para o IC_{env}

FA	FF	PAF _T	FS	AVS**	AHS**
0,08	0,21	0,25	Variável*	0,00	0,00

* O FS é específico de cada modelo

**Os modelos não possuem proteção horizontal e vertical

Fonte: Elaborado pelo autor

O RTQ-C fornece os parâmetros de entrada para o indicador de consumo mínimo (IC_{min}) e o indicador de consumo máximo (IC_{maxD}), ambos determinam os limites dos intervalos dos níveis de eficiência que a edificação deve se inserir. Estes parâmetros são iguais para os três modelos, tabelas 16 e 17, pois, são exclusivos para a Zona Bioclimática 8.

Tabela 16: Parâmetros do IC_{min}

PAF _T	FS	AVS	AHS
0,05	0,87	0	0

Fonte: PROCEL 2016, p. 109

Tabela 17: Parâmetros do IC_{maxD}

PAF _T	FS	AVS	AHS
0,60	0,61	0	0

Fonte: PROCEL 2016, p. 108

Os parâmetros exclusivos necessários para a classificação final, como a resistência térmica (R) e a transmitância térmica (U), foram calculados para cada modelo e serão apresentados individualmente, assim como a classificação final de eficiência energética alcançada. Para isso, resistência térmica superficial interna e externa precisa ser utilizada para cada componente da envoltória, a tabela 18 apresenta os valores em relação à direção do fluxo de calor.

Tabela 18: Resistências térmicas interna e externa

R_{si} ($m^2.K/W$)			R_{se} ($m^2.K/W$)		
Direção do fluxo de calor interno			Direção do fluxo de calor externo		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

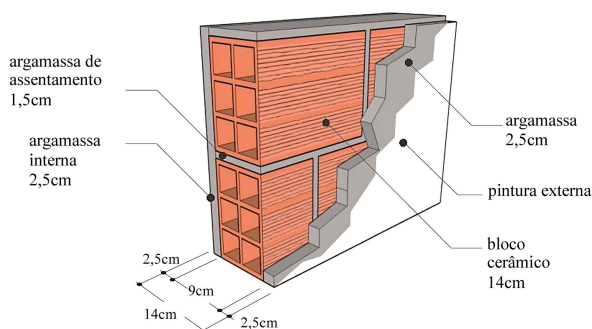
Fonte: ABNT 2005b, adaptado pelo autor

Com os parâmetros comuns definidos para os dois modelos, as etapas subsequentes classificarão as edificações através das variáveis exclusivas da envoltória: paredes, coberturas e os vidros das esquadrias.

4.1. CLASSIFICAÇÃO FINAL ENVOLTÓRIA MODELO REFERÊNCIA

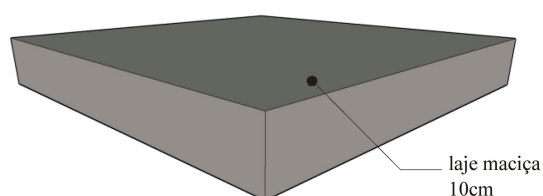
Os parâmetros exclusivos da envoltória do modelo Referência é caracterizado por paredes de 14cm de espessura (figura 18), composta por bloco cerâmico de 6 furos (9x14x24cm) e reboco nas duas faces (2,5cm); e a cobertura é laje simples de concreto maciço com 10 cm de espessura (Figura 19).

Figura 18: Vedação vertical Modelo Referência



Fonte: PROCEL 2013, adequado pelo autor

Figura 19: Vedação horizontal Modelo Referência



Fonte: PROCEL 2013, adequado pelo autor

A tabela 19 detalha as dimensões e a propriedade térmica dos componentes que compõem a envoltória e que são imprescindíveis para calcular a resistência e transmitância térmica que definirão o nível de eficiência da edificação.

Tabela 19: Características dos componentes do Modelo Referência

Componentes		Dimensões (m)						Furos (m)		Cond. térmica (λ) (W/(m.K))
		e	L	H	P	e _{int}	e _{ext}	L	H	
Paredes	Reboco Externo	0,025								1,15
	Tijolo Cerâmico 9x14x24cm		0,090	0,140	0,240	0,006	0,007	0,035	0,038	0,92
	Reboco Interno	0,025								1,15
Cobertura	Concreto	0,100								1,75

Fonte: NBR 15220, 2005 e desenvolvida pelo autor

A resistência térmica total da cobertura foi $R_{Tc} = 0,267(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$ e as paredes obtiveram a resistência térmica total de $R_{Ta} = 0,841(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$, as transmitância térmica (U) foram $3,743\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ e $1,189\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$, respectivamente. Desta forma, o valor encontrado para a cobertura impossibilitou a classificação A para o modelo Referência, influenciado também pela sua absorvância (α), já que o concreto possui coloração que retém uma parcela considerável de radiação, transformando-a em calor, conforme pode ser observado os valores em negrito na tabela 20.

Tabela 20: Classificação do Modelo Referência em relação à Transmitância e Absorvância

Dados	Nível A	Nível B	Nível C e D	Resultado
Transmitância parede**	$\leq 3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$			1,189
Transmitância cobertura (C)	$\leq 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$	3,743
Absorvância parede	< 0,5	-	-	0,158
Absorvância cobertura (C)	< 0,5	< 0,5	-	0,716

**Capacidade Térmica > 80 kJ/m²K / C – Climatizado

Fonte: Elaborado pelo autor

O Fator Solar (FS) relacionado aos vidros das esquadrias possui influência direta no cálculo do IC_{env} , sendo que o valor utilizado está presente nos parâmetros das opções de modelos disponibilizados pela ferramenta do BIM e que atende às características da edificação referência (tabela 21)

Tabela 21: Classificação dos vidros

Tipo	Espessura	FS	U (W/m ²)
Monolítico claro	6,00mm	0,62	5,9050

Fonte: Elaborada pelo autor

Desta forma, após o cálculo o modelo Referência obteve um IC_{env} de 426,02, sendo classificado como Nível B de eficiência para a envoltória (tabela 22).

Tabela 22: Classificação envoltória Modelo Referência

Eficiência	A	B	C	D	E
Lim Mín	-	425,33	429,47	433,62	437,76
Lim Máx	425,32	429,46	433,61	437,75	-

Fonte: elaborada pelo autor

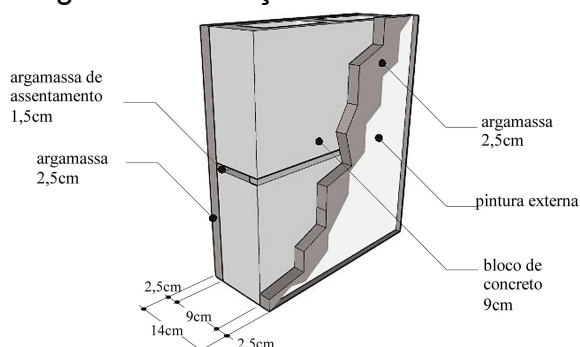
Concluído os cálculos pelo método prescrito conforme apresentado, o modelo Referência alcançou a classificação nível C e D de eficiência energética para a envoltória em função da sua cobertura, no entanto, em relação à parede obteve nível A. Quanto ao IC_{env} , o cálculo demonstrou que a edificação ficou posicionada dentro do intervalo dos níveis de eficiência energética B (Apêndice A).

Os cálculos para a envoltória do modelo Referência confirmam que as características construtivas presentes em 40% das edificações comerciais (LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006) acarretam na baixa eficiência energética, tendo classificação final C e D.

4.2. CLASSIFICAÇÃO FINAL ENVOLTÓRIA MODELO AJUSTADO

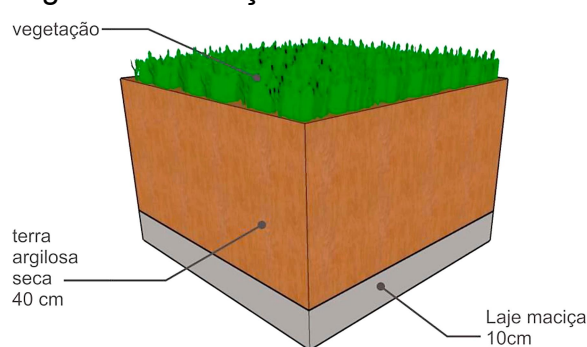
O modelo Ajustado sofreu adequações em todos os componentes da envoltória. A parede passou a ser constituída por bloco de concreto com 2 furos (9x19x39cm) e reboco nas duas faces com 2,5cm de espessura, permanecendo com 14cm de espessura (figura 20), a cobertura manteve a laje de concreto maciço com 10 cm de espessura de concreto e foi acrescida terra argilosa seca (40cm) e vegetação (Figura 21).

Figura 20: Vedação vertical Modelo 3



Fonte: PROCEL 2013, adequado pelo autor.

Figura 21: Vedação horizontal Modelo 3



Fonte: PROCEL 2013, adequado pelo autor.

A tabela 23 detalha as dimensões e a propriedade térmica dos componentes que compõem a envoltória e que são imprescindíveis para calcular a resistência e transmitância térmica que definirão o nível de eficiência da edificação.

Tabela 23: Características dos componentes do Modelo Ajustado

Componentes		Dimensões (m)						Furos (m)		Cond. térmica (λ) (W/(m.K))
		e	L	H	P	e _{int}	e _{ext}	L	H	
Paredes	Reboco Externo	0,025								1,15
	Bloco Concreto 9x19x39cm		0,090	0,190	0,390	0,020	0,020	0,030	0,165	1,75
	Reboco Interno	0,025								1,15
Cobertura	Vegetação	0,100								-
	Terra argilosa seca	0,400								0,52
	Concreto	0,100								1,75

Fonte: NBR 15220, 2005 e desenvolvida pelo autor

Com as alterações a cobertura passou a ter resistência térmica total (R_{Tc}) igual a $1,036(m^2K)/W$ e as paredes obtiveram melhoria significativa com a resistência térmica total (R_{Ta}) de $2,958(m^2K)/W$. O ganho obtido pelos componentes permitiu que o modelo Ajustado obtivesse a classificação A, pois a sua transmitância térmica (U) ficou abaixo do limite estipulado para ambientes climatizados e a absorvância (α), por ser cobertura verde, também foi satisfatório, permitindo uma baixa retenção de radiação e conseqüentemente pouco calor, conforme pode ser observado os valores em destaque na tabela 24.

Tabela 24: Classificação Modelo Ajustado em relação à Transmissão e Absorção

Dados	Nível A	Nível B	Nível C e D	Resultado
Transmissão parede**	$\leq 3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$			0,338
Transmissão cobertura (C)	$\leq 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$	0,965
Absorção parede	< 0,5	-	-	0,158
Absorção cobertura (C)	< 0,5	< 0,5	-	0,250

** $C_T > 80 \text{ kJ/m}^2\text{K} / \text{C}$ – Climatizado

Fonte: Elaborado pelo autor

As esquadrias também foram adequadas, sendo escolhido o modelo com um Fator Solar (FS) que permitiu, depois de calculado, o IC_{env} , alcançar um valor melhor que o do modelo Referência (tabela 25).

Tabela 25: Classificação dos vidros

Tipo	Espessura	FS	U (W/m^2)
Reflexivo - 20% aço inoxidável vidro claro	6,00mm	0,31	5,9050

Fonte: Elaborada pelo autor

Desta forma, após o cálculo o modelo Ajustado obteve um IC_{env} de 423,83, sendo classificado como Nível A de eficiência para a envoltória (tabela 26).

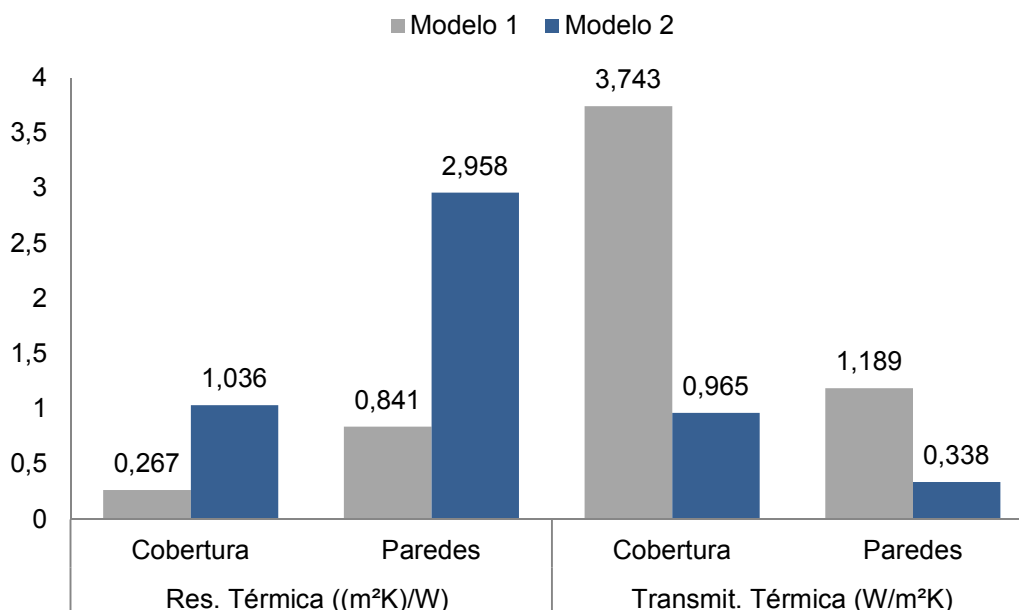
Tabela 26: Classificação envoltória Modelo Referência

Eficiência	A	B	C	D	E
Lim Mín	-	425,33	429,47	433,62	437,76
Lim Máx	425,32	429,46	433,61	437,75	-

Fonte: elaborada pelo autor

Após as adequações dos componentes da envoltória, os cálculos do método prescritivo do modelo Ajustado (Apêndice B) apresentaram ganhos substanciais em relação ao modelo Referência (figura 22) permitindo alcançar classificação A nas variáveis cobertura e paredes.

Figura 22: Comparativo entre os Modelos Referência e Ajustado



Fonte: Elaborado pelo autor

Em se tratando da variável Fator Solar (FS) dos vidros das esquadrias que interfere no resultado final do IC_{env} , a redução pela metade do valor do FS acarretou em um IC_{env} que permitiu ao modelo Ajustado a classificação A (tabela 27).

Tabela 27: Fator Solar e IC_{env} dos Modelos Referência e Ajustado

	Fator Solar (FS)	IC_{env}
Modelo Referência	0,62	426,02
Modelo Ajustado	0,31	423,83

Fonte: Elaborado pelo autor

Definidos os níveis de eficiência energética da envoltória para os modelos Referência e Ajustado através do método prescritivo e os valores das variáveis calculados, a modelagem na ferramenta do BIM escolhida deverá contemplar todas as informações pertinentes aos modelos para que estes sejam idênticos aos originais, que posteriormente serão compartilhados com os programas BEM para as simulações energéticas.

CAPÍTULO 5 – MODELAGEM, INTEROPERABILIDADE E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA EDIFICAÇÃO

5. MODELAGEM, INTEROPERABILIDADE E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA EDIFICAÇÃO

Neste capítulo serão realizadas as modelagens da edificação com a envoltória de Referência e a envoltória Ajustada – os modelos Referência e Ajustado. O processo de criação dos modelos foi dividido em três etapas: 1) a modelagem da edificação padrão; 2) caracterização energética do modelo padrão; 3) finalização dos modelos de estudo. Na sequência os modelos serão compartilhados com as ferramentas de simulação energética por meio das extensões IFC e gbXML.

5.1. MODELAGEM DA EDIFICAÇÃO PADRÃO NA FERRAMENTA DO BIM

A criação do modelo da edificação padrão atende as características arquitetônicas básicas comuns aos dois modelos (quadro 21). Tendo tais informações e os processos de modelagem da ferramenta BIM permitem que a edificação padrão modelada possua certo avanço de detalhes construtivos, tais como espessura das paredes e lajes; dimensões das esquadrias; tipo de cobertura e identificação das alvenarias, que foram denominadas conforme orientação cardinal (norte, sul, leste e oeste).

Quadro 21: Características básicas modelos

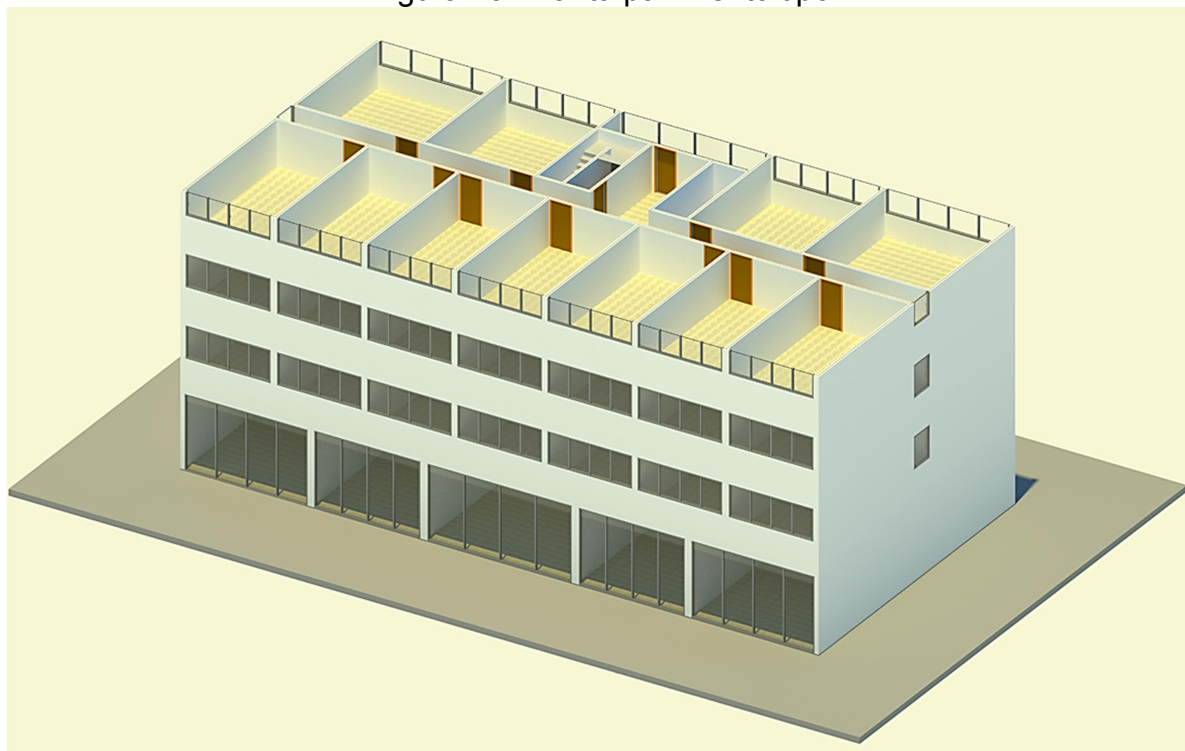
Componentes	Valores
Gabarito	11 pavimentos
Forma da planta	Retangular
Dimensões da planta	15x30m
Pé direito livre	3,00m
Salas por pavimento	11
Proteção Solar	Sem proteção
PAF	≤ 50% nas maiores fachadas

Fonte: Elaborado pelo autor

A perspectiva seccionada (figura 23) propicia o entendimento do pavimento tipo do modelo padrão, onde é possível verificar o formato retangular da edificação e a distribuição dos ambientes: as 11 salas – 7 localizadas na fachada norte e 4 na fachada sul; a circulação horizontal; as circulações verticais (escada de incêndio e elevadores) e a área técnica. Outra característica construtiva também está visível

como as esquadrias com dimensões correspondentes à quase a largura total das salas de a área técnica.

Figura 23: Planta pavimento tipo



Fonte: Elaborado pelo autor

A perspectiva norte/oeste (figura 24) permite compreender o modelo no que tange as suas características arquitetônicas. Em se tratando de suas aberturas, a fachada norte possui um PAF (Percentual de Abertura da Fachada) de aproximadamente 39%, já descontada os perfis das esquadrias, já a fachada oeste possui o PAF de aproximadamente 3%. Em relação aos elementos de proteção solar, estes não possuem, atendendo às características básicas do modelo da edificação, tanto na horizontal quanto na vertical. Para o RTQ-C estes elementos correspondem ao Ângulo Vertical de Sombreamento (AVS) e ao Ângulo Horizontal de Sombreamento (AHS), respectivamente, tendo para ambos um valor nulo no cálculo do método prescritivo.

Figura 24: Perspectiva norte/oeste



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 25 são vistas as fachadas sul e leste. Semelhante à fachada oeste, a leste também possui um PAF de 3% aproximadamente, já a fachada sul possui um PAF mais reduzido comparada à fachada norte, com aproximadamente 33%. Seguindo o padrão construtivo, a proteção solar é também inexistente, desta forma, os valores dos AVS e AHS, serão nulos no cálculo do método prescritivo.

Figura 25: Perspectiva sul/leste



Fonte: Elaborado pelo autor

Tendo concluída a modelagem padrão atendendo aos parâmetros já definidos e apresentados, a etapa subsequente é a de caracterização energética da edificação, elevando o nível de detalhamento e informação.

5.2. CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DO MODELO PADRÃO

Com a edificação padrão modelada é necessário inserir a informações referentes aos padrões de uso, ocupação e demandas energéticas (quadro 22), assim como a sua localização geográfica. Nesta etapa a inserção desses parâmetros segue o processo definido pela ferramenta do BIM elegida.

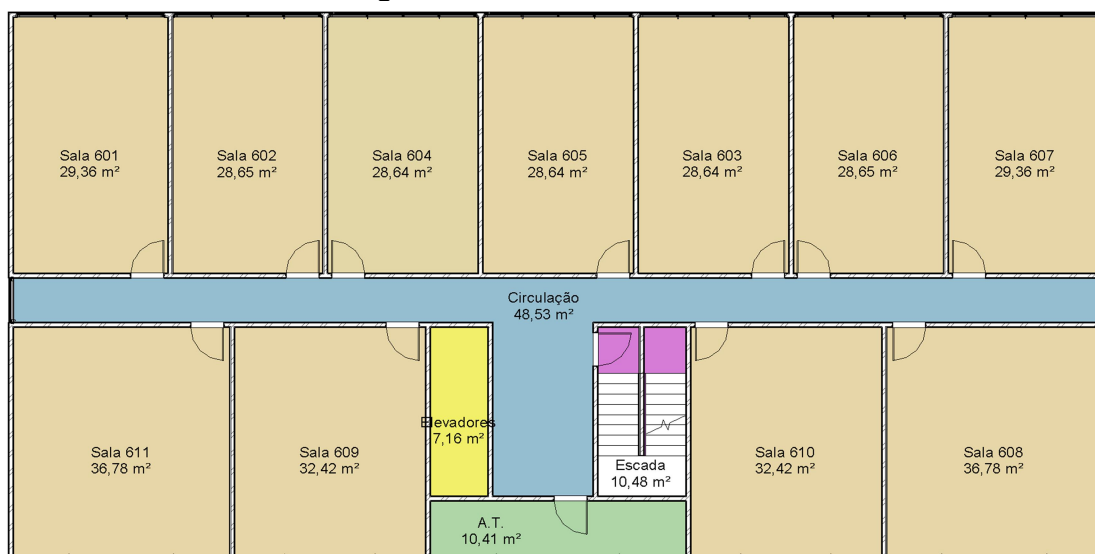
Quadro 22: Uso, ocupação e demandas energéticas.

Variável	Valores/Parâmetros
Tipo de atividade	Escritório
Horário de funcionamento	Ocupação Total: 8h às 12h e 14h às 18h e de 50%: 12h às 14h
Densidade de ocupação	0,14 pessoas/m ² ou 1 pessoa/7,15 m ²
Carga de iluminação	20 W/m ²
Carga dos equipamentos	10 W/m ²
Temperatura de Controle	24°C
Sistema de ar condicionado	Split piso-teto sem renovação de ar.

Fonte: Elaborado pelo autor

Como etapa predecessora é necessário configurar internamente a edificação, criando os ambientes, os espaços e as zonas AVAC. Inicialmente são criados os ambientes, que são subdivisões internas do modelo de edificação criados com base nos elementos paredes, pisos, telhados e tetos. Os ambientes são componentes de arquitetura utilizados para calcular e guardar informações do perímetro, área e o volume sobre áreas criadas (figura 26).

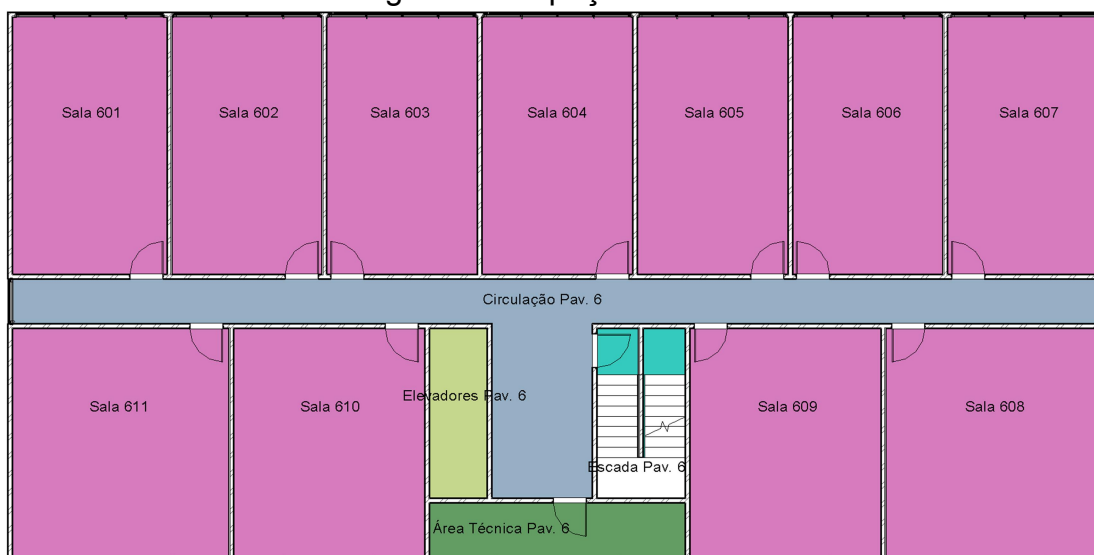
Figura 26: Ambientes internos



Fonte: Elaborado pelo autor

Os espaços (figura 27) são componentes independentes dos ambientes e utilizados para propósitos distintos. Ao contrário dos ambientes, os espaços são empregados exclusivamente para as disciplinas MEP (*mechanical, electrical and plumbing* = mecânica, elétrica e hidrossanitário) para analisar o volume. As informações referentes às áreas que receberam estes componentes são utilizadas para executar uma análise de carga de aquecimento e resfriamento (AUTODESK, 2017).

Figura 27: Espaços internos



Fonte: Elaborado pelo autor

Com os espaços criados faz-se necessário a inserção dos dados para cada propriedade dos seus parâmetros, tais informações caracterizam o modelo

energético da edificação. No entanto, certas propriedades são exclusivas de cada modelo, resultantes das características particulares das edificações estudadas. Na tabela 28 é possível verificar os valores comuns para os dois modelos estudados, sendo os valores exclusivos resultantes das propriedades das envoltórias.

Tabela 28: Parâmetros e propriedades dos espaços

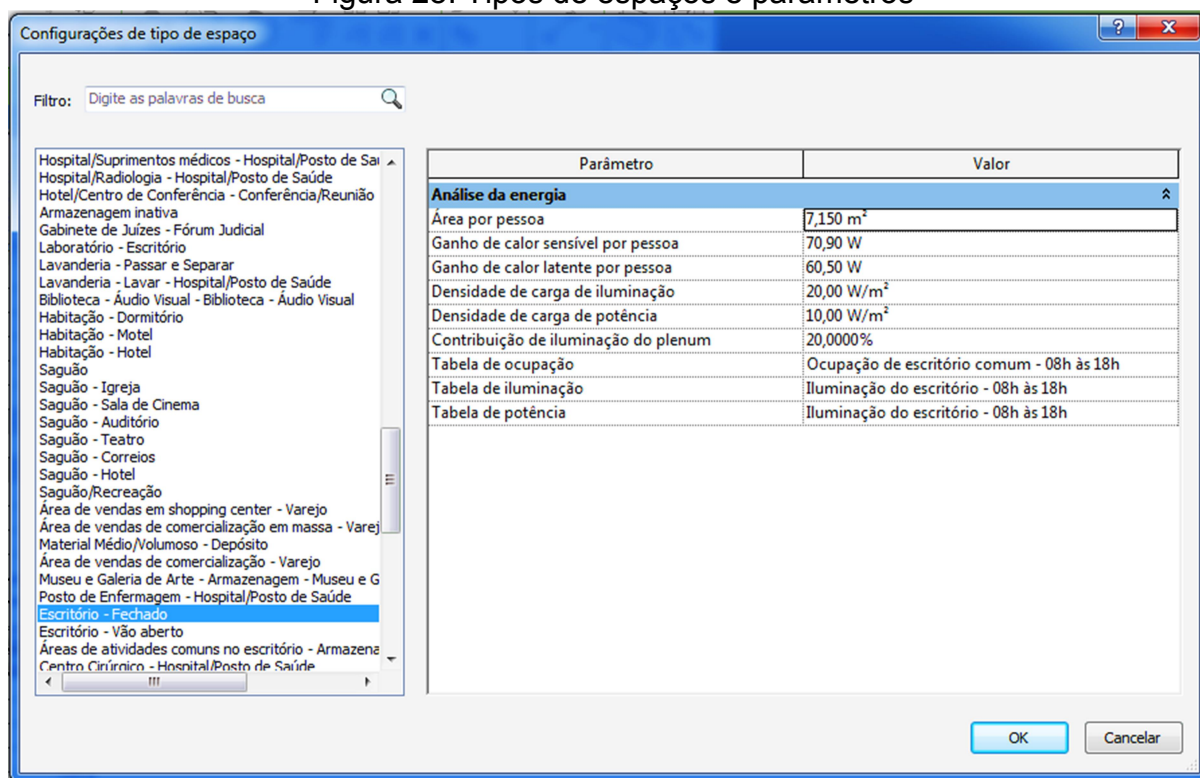
Parâmetro	Propriedades	Valores
Restrições	Nível*	Específico de cada Pav.
	Limite superior	Plenum de cada Espaço
	Deslocamento do limite	0,00 m
	Deslocamento base	0,00 m
Iluminação elétrica	Iluminação média estimada**	0,00 lx.
	Relação de cavidade do ambiente**	0,00
	Plano de referência de cálculo de iluminação	0,70 m
	Reflexão do forro	75%
	Reflexão da parede	50%
	Reflexão do piso	20%
Cargas elétricas	Projetar carga AVAC por área	Específico de cada Espaço e idêntico entre os modelos estudados
	Projetar outras cargas por área	30,00 W/m ²
Mecânica: Fluxo do ar	Suprimento de fluxo de ar especificado***	Exclusivo de cada Modelo
	Suprimento de fluxo de ar calculado**	Exclusivo de cada Modelo
	Suprimento de fluxo de ar real**; Fluxo de ar de retorno especificado***; Fluxo de ar de retorno real**; Fluxo de ar de exaustão especificado***; Fluxo de ar de exaustão real**.	0,00 L/s
Cotas	Área**, Perímetro**, Altura não vinculada**, Volume**.	Específicos de cada Espaço e idênticos entre os modelos estudados
Dados da identidade	Número; Nome; Número do ambiente*; Nome do ambiente*; Comentários; Imagem.	Específicos de cada Espaço e idênticos entre os modelos estudados
Fase	Fase*	Construção Nova
Análise de energia	Ocupação	Sim ou não
	Plenum	Sim ou não
	Zona*	Específico de cada Pav.
	Tipo de condição	Resfriado ou ventilação natural
	Tipo de espaço	Relacionado ao uso
	Tipo de construção	Específico para modelo não detalhado
	Pessoas	1 pessoa/7,15m ²
	Cargas elétricas	Ilum. 20 W/m ² e equip. 10 W/m ²
	Carga aquecimento calculada** e do projeto***	Não calculado. Não há aquecimento
	Carga resfriamento calculada** e do projeto***	Exclusivo de cada Modelo

*Não editáveis. **Não editáveis calculadas pela ferramenta. ***Editáveis calculadas pela ferramenta.

Fonte: Autodesk, 2017 – adaptado pelo autor

O “Tipo de espaço” possui dezenas de opções pré-definidas de ambientes e usos, com parâmetros e valores utilizados diretamente na análise energética. Os valores desses parâmetros permitem edição e serão incorporados diretamente nas propriedades dos espaços. Em se tratando das salas, por exemplo, foi definido a perfil de “Escritório – fechado”, em destaque os parâmetros relacionados ao uso, ocupação e demanda energética apresentados na tabela (figura 28).

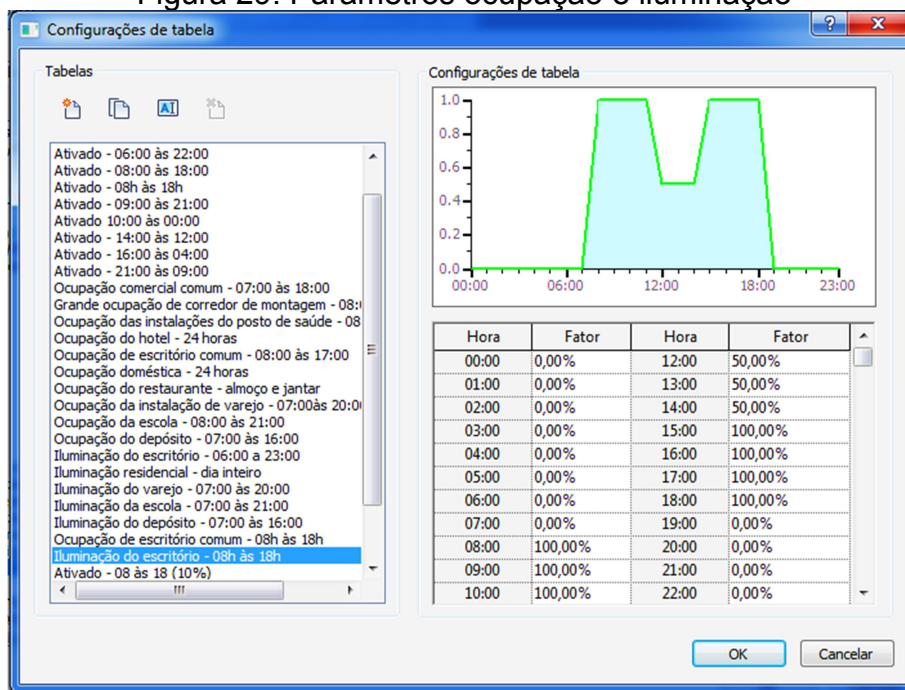
Figura 28: Tipos de espaços e parâmetros



Fonte: Revit 2017 - adaptado pelo autor

Os valores atribuídos para os parâmetros “Área por pessoa”, “Densidade de carga de iluminação” e “Densidade de carga de potência” são oriundas das variáveis de uso e ocupação apresentados no quadro 22. Tais dados também resultaram na adequação dos valores para a “Tabela de ocupação”, “Tabela de iluminação” e “Tabela de potência”. Para as três tabelas foram utilizados os mesmos valores (figura 29).

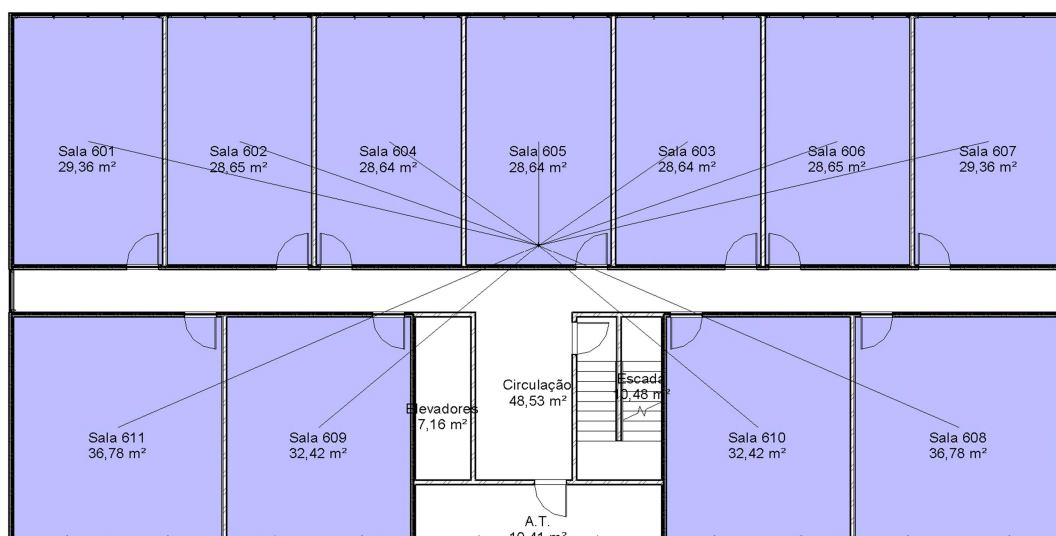
Figura 29: Parâmetros ocupação e iluminação



Fonte: Revit 2017 - adaptado pelo autor

Próxima etapa é a criação das zonas de AVAC em cada pavimento (figura 30). As zonas consistem em um ou mais espaços que possuem sistemas de controle ambiental, tais como, resfriamento, aquecimento e umidade. No entanto, zona e espaços são componentes independentes utilizados em conjunto. Desta forma é possível executar o reequilíbrio da carga e os procedimentos de análise para um modelo de edificação. Nos modelos estudados as zonas foram criadas para as quatro lojas e o lobby, independentes, no térreo e as salas dos pavimentos tipo.

Figura 30: Zonas de AVAC



Fonte: Elaborado pelo autor

A zona possui informações das temperaturas de resfriamento e aquecimento, que em conjunto com as informações dos espaços utilizadas para o cálculo do volume do ambiente e para determinar as cargas de resfriamento e aquecimento, são empregadas na análise de cargas de resfriamento e aquecimento para determinar os requisitos de energia da edificação (AUTODESK, 2017).

Semelhante às propriedades dos espaços, as propriedades das zonas são divididas em: comuns ao modelo padrão e exclusivas para cada modelo estudado. O quadro 23 apresenta os parâmetros, propriedades e valores que são utilizadas para determinar a eficiência energética da edificação.

Quadro 23: Parâmetros e propriedades das zonas AVAC

Parâmetro	Propriedades	Valores
Restrições	Nível*	Específico de cada Pav.
Mecânica: Fluxo do ar	Suprimento de fluxo de ar calculado**	Exclusivo de cada Modelo
	Suprimento de fluxo de ar calculado por área**	Exclusivo de cada Modelo
Cotas	Área ocupada**, Área bruta**, Volume ocupado**, Volume bruto**, Perímetro**.	Específicos de cada Zona e idênticos entre os modelos estudados
Dados da identidade	Imagem; Comentários; Nome.	Específicos de cada Zona e idênticos entre os modelos estudados
Fase	Fase*	Construção nova
Análise de energia	Tipo de serviço	Sistema de resfriamento
	Bypass da serpentina	0,00%
	Informações sobre o resfriamento	Resfriamento do ar: 22°C
	Informações sobre o aquecimento	Aquecimento do ar: 22°C
	Informações do ar externo	Não considerado
	Carga de aquecimento calculada**	Não calculado. Não há aquecimento
	Carga de aquecimento calculada por área**	
	Área calculada por carga de aquecimento**	
	Carga de resfriamento calculada**	Exclusivo de cada Modelo
	Carga de resfriamento calculada por área**	
	Área calculada por carga de resfriamento**	

*Não editáveis. **Não editáveis calculadas pela ferramenta. ***Editáveis calculadas pela ferramenta.

Fonte: Autodesk, 2017 – adaptado pelo autor

Para o cálculo de certas propriedades dos modelos a ferramenta utiliza, além das informações inseridas diretamente nos parâmetros editáveis dos espaços e das zonas, dados provenientes das Configurações de Energia do modelo (figura 31), que no estudo são os mesmos para os dois modelos.

Figura 31: Configurações de energia dos modelos

Parâmetro	Valor
Essencial	
Localização	Vitória, Brasil
Modelo analítico de energia	
Modo	Utilizar massas conceituais e elementos de construção
Nível de referência	Pav. Térreo
Fase do projeto	Construção nova
Resolução do espaço analítico	0,1524
Resolução da superfície analítica	0,0762
Profundidade da zona do perímetro	2,5000
Divisão de zonas do perímetro	<input type="checkbox"/>
Avançado	
Outras opções	Editar...

Fonte: Revit 2017 - adaptado pelo autor

Os parâmetros básicos para a configuração de energia do modelo estão distribuídos em “Essencial” e “Modelo analítico de energia”. No primeiro é definida a localização da edificação, que para este estudo foi definida a cidade de Vitória, capital do Espírito Santo. Para o segundo, o valor atribuído à propriedade “Modo” engloba todas as etapas de construção virtual de uma edificação, desde o conceito ao detalhamento das informações. Para as demais os valores foram atribuídos em função de suas definições (AUTODESK, 2017):

- Nível de referência: o nível abaixo do qual a superfície da edificação deve estar em contato com o solo para a transferência de calor;
- Fase do projeto: todos os elementos de construção que compõem a edificação devem estar atribuídos para a mesma fase, caso contrário não serão considerados na análise energética. Esta informação será utilizada nos parâmetros dos espaços e zonas;
- Resolução do espaço analítico e da superfície analítica: o primeiro define a distância de folga mínima entre elementos na identificação de espaços do modelo de energia e o segundo permite localizar as superfícies analíticas individuais. Em conjunto fornecem informações importantes para gerar o modelo de energia.
- Profundidade da zona do perímetro: distância interna a partir das paredes externas para definir a zona de perímetro. O interior da edificação possui

cargas de resfriamento que diferem do perímetro por não está exposto diretamente ao clima externo ou à luz natural das janelas.

Quanto ao parâmetro “Avançado”, ao acessar a opção de “Editar” é disponibilizada as “Configurações avançadas de energia” (figura 32), onde os parâmetros existentes permitem o maior detalhamento do modelo energético da edificação.

Figura 32: Configurações avançadas de energia

Parâmetro	Valor
Modelo detalhado	
Percentual de destino da vidraça	35%
Altura de destino do parapeito	1,1000
A vidraça está sombreada	<input type="checkbox"/>
Profundidade da sombra	0,6000
Percentual de destino da clarabóia	0%
Largura e profundidade da &clarabóia	0,9144
Dados de construção	
Tipo de construção	Escritório
Tabela de operações de construção	Instalação 12/5
Sistema AVAC	Gás de sistema dividido/compacto residencial 14 SEER/0.9 AFUE
Informações sobre o ar exterior	Editar...
Ambiente/Espaço de dados	
Exportar categoria	Espaços
Propriedades térmicas do material	
Tipos conceituais	Editar...
Tipos esquemáticos	<Construção>
Elementos detalhados	<input checked="" type="checkbox"/>

Fonte: Revit 2017 - adaptado pelo autor

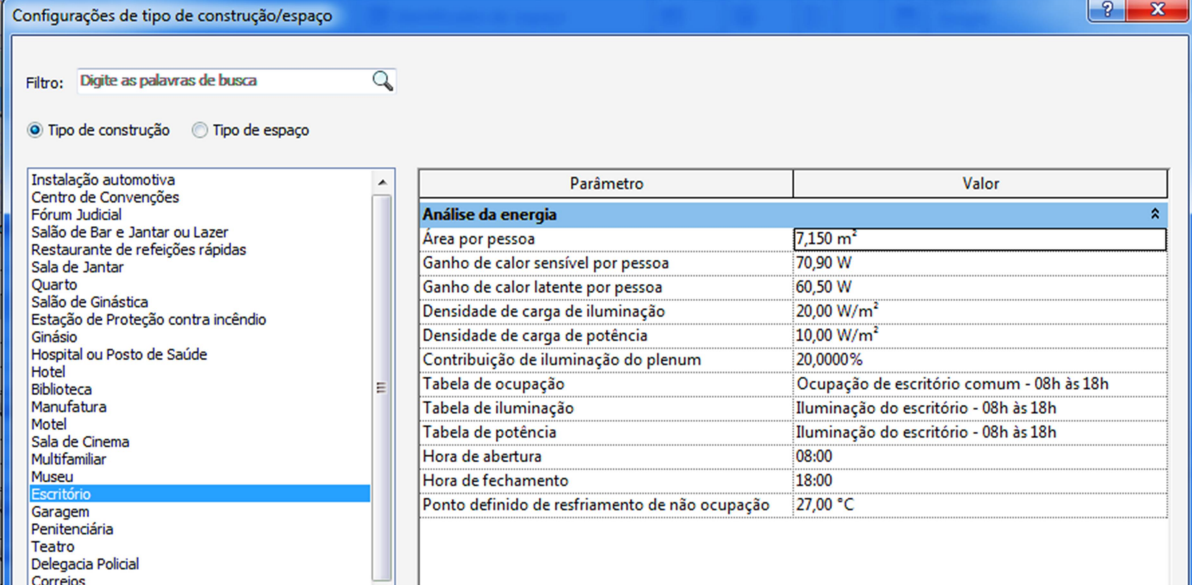
Nesta etapa, os valores e informações atribuídos aos parâmetros serão utilizados diretamente e indiretamente (os resultados dos cálculos realizados pela ferramenta) nas propriedades dos espaços e das zonas AVAC. No “Modelo detalhado” as propriedades com a cor do texto mais clara não estão editáveis, pois, são vinculadas às propriedades que estão nulas: “A vidraça está sombreada” e “Percentual de destino da claraboia”, que nos modelos estudados são inexistentes. Para o “Percentual de destino da vidraça” foi atribuído à média do percentual de abertura das fachadas norte e sul, as mais envidraçadas, já a “Altura de destino do parapeito” está definida de acordo com o modelo padrão.

Em relação aos “Dados de construção” as informações interferem diretamente na análise de eficiência energética dos modelos estudados. Os valores atribuídos são escolhidos e adequados dentre os dados pré-definidos disponíveis na ferramenta.

Para o “Tipo de construção”, os detalhes referentes às proposições, que são usadas para cada tipo de construção durante a análise de energia ou da análise de cargas de resfriamento, são baseados nos dados da ASHRAE 90.1/2010, ASHRAE 90.2/2010, ASHRAE 62.1, CBECS e em outros levantamentos de construção (AUTODESK, 2017).

Mesmo pré-determinados os parâmetros podem ser editados à realidade em estudo, desta forma, as informações foram ajustadas para estarem de acordo com os espaços e as características de uso e ocupação da edificação referência (figura 33).

Figura 33: Tipo de construção



Parâmetro	Valor
Análise da energia	
Área por pessoa	7,150 m ²
Ganho de calor sensível por pessoa	70,90 W
Ganho de calor latente por pessoa	60,50 W
Densidade de carga de iluminação	20,00 W/m ²
Densidade de carga de potência	10,00 W/m ²
Contribuição de iluminação do plenum	20,0000%
Tabela de ocupação	Ocupação de escritório comum - 08h às 18h
Tabela de iluminação	Iluminação do escritório - 08h às 18h
Tabela de potência	Iluminação do escritório - 08h às 18h
Hora de abertura	08:00
Hora de fechamento	18:00
Ponto definido de resfriamento de não ocupação	27,00 °C

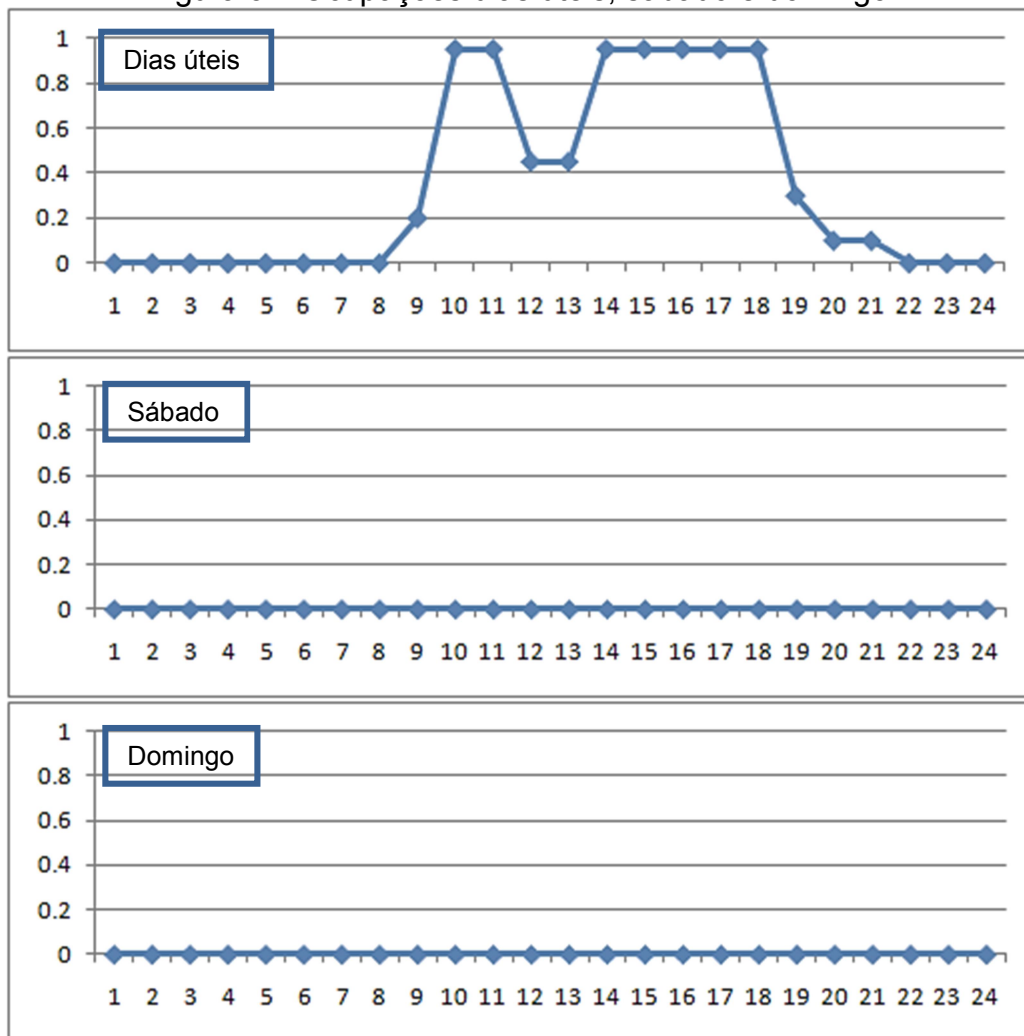
Fonte: Revit 2017 - adaptado pelo autor

A “Tabela de operações de construção” fornece informações sobre as hipóteses de ocupação para diferentes operações da edificação que serão usadas durante as análises de energia, tais hipóteses têm base nas normas ASHRAE. Quando definida, esta tabela sobrepõe à operação padrão, que tem base no “Tipo de construção” selecionado. O impacto pode ser significativo nos resultados de energia, desta forma, a escolha deve se aproximar ao máximo com das projetadas para a operação da construção (AUTODESK, 2017).

Para os modelos em estudo a ocupação definida foi a 12/5 (figura 34) que estipula uma relação de uso de 12h diárias durante 5 dias da semana. Nos dias úteis a ocupação se inicia às 09hs e vai até às 21hs, com redução de 50% da ocupação entre às 12hs e 13hs. Já aos sábados e domingos a ocupação é nula. A tabela

fornece valores horários para um período de 24 horas (0 a 24 no eixo X) e em relação à ocupação (0 a 1 no eixo Y) de 0% a 100%.

Figura 34: Ocupações dias úteis, sábado e domingo.



Fonte: Autodesk 2017

Seguindo o mesmo padrão, o “Sistema AVAC” também é pré-definido pela ferramenta, desta forma, foi escolhido o sistema que mais se aproxima ao equipamento utilizado como referência (tabela 29).

Tabela 29: Sistema de climatização

14 SEER/0.9 AFUE Split/Completo Gás <5.5 ton. residencial
<ul style="list-style-type: none"> • 14 SEER eficiente/fornalha de 90% AFUE <5.5 ton. split/completo de sistema com aquecimento a gás • Ventilador de ciclo de volume constante residencial • Manômetro de água de 2.0 polegadas (498 pascals) com sistema de dutos de pressão estática de volume constante • Unidade de água quente residencial (fator de energia de 0.575)

Fonte: Autodesk 2017

Os “Dados de ambientes/espços” determina se as informações do ambiente ou do espaço são utilizadas na análise, para tanto, em “Exportar categoria” deve estar definido qual será utilizado. Quando este parâmetro estiver definido como ambientes, é enviado o nome e número do ambiente, no caso dos espaços, são compartilhadas as seguintes informações utilizadas na análise: nome e número do objeto de espaço, ocupação, iluminação, equipamento e zona. Desta forma, fica definido como espaços (AUTODESK, 2017).

Por último, para as “Propriedades térmicas dos materiais” são fornecidas três maneiras para especificar as propriedades térmicas do material de elementos de construção para a análise de energia: Tipos conceituais; Tipos esquemáticos e Elementos detalhados, este último quando escolhido sobrepõe aos tipos de conceitual e tipos esquemáticos (AUTODESK, 2017).

Como os modelos em estudo são baseados nos resultados dos cálculos do método prescritivo, os elementos de construção da envoltória (paredes, telhado e esquadrias) tiveram as suas propriedades térmicas adicionadas aos elementos detalhados, desta forma, a análise de energia fornecerá resultados mais realistas.

5.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS REFERÊNCIA E AJUSTADO

Concluída a criação do modelo padrão a próxima etapa é a caracterização dos modelos de estudo. São inseridas na ferramenta do BIM as informações oriundas dos cálculos desenvolvidos no método prescritivo para as variáveis de teste – paredes e cobertura – que diferenciam os dois modelos, Referência e Ajustado. Os vidros tiveram processo inverso, como o Revit possui componentes esquadrias pré-definidos, foram escolhidos os modelos e os valores de seus parâmetros aplicados ao método prescritivo.

Os procedimentos no Revit para esta etapa são idênticos para todos os componentes da envoltória, tanto para o modelo referência quanto para o modelo ajustado. Desta forma, será apresentado detalhadamente o procedimento executado para a parede do modelo referência, sendo que para os demais componentes, e modelo ajustado, somente serão apresentados os valores da resistência térmica (R), transmitância térmica (U) e fator solar (FS).

5.3.1. Modelo Referência

Iniciando com o modelo referência, a tabela 30 apresenta as características construtivas dos componentes da envoltória e dessas variáveis de teste, valores estes que constarão nas propriedades dos elementos correlatos do modelo na ferramenta do BIM.

Tabela 30: Modelo referência - variáveis de teste e seus valores

Variáveis de teste	Modelo Referência	Valores
Fator Solar vidros das esquadrias	Esquadria simples com vidro 6mm translúcido	FS = 0,62*
Componentes das paredes	Alvenaria 14 cm (Bloco cerâmico de 6 furos – 9x14x24cm; Reboco de 2,5cm)	R = 0,841 (m²K)/W U = 1,189 W/(m²K)
Componentes da Cobertura	Laje simples, concreto de 10 cm.	R = 0,267 (m²K)/W U = 3,743 W/(m²K)

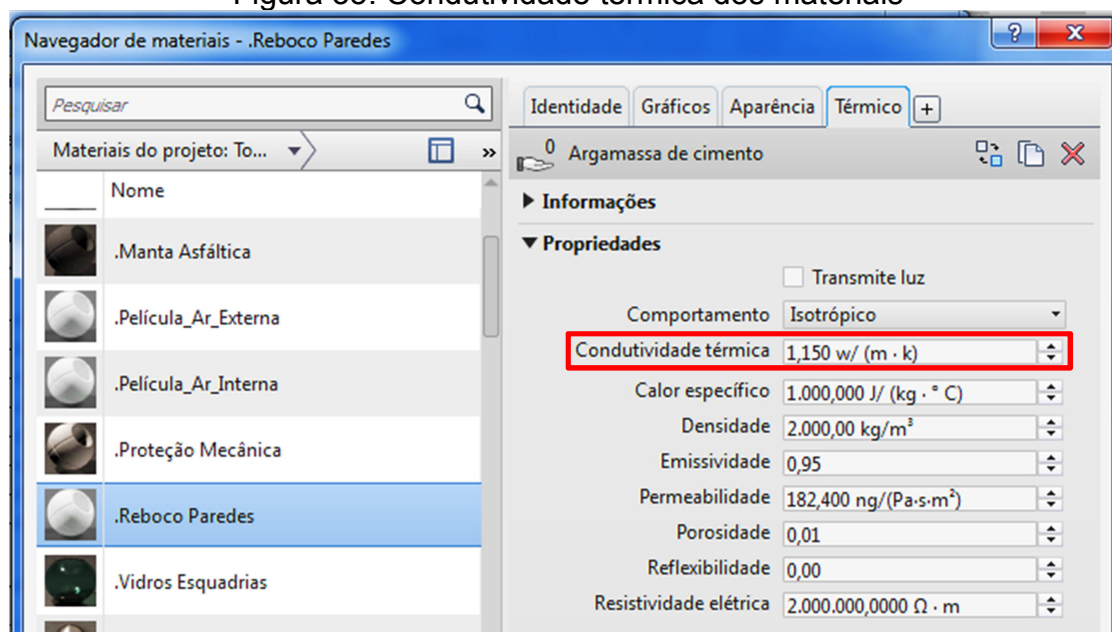
*Valor oriundo do componente pré-definido do Revit

Fonte: Elaborado pelo autor

As paredes foram identificadas de acordo com a sua posição, resultando em: Alvenaria Externa Norte; Alvenaria Externa Sul; Alvenaria Externa Leste e Alvenaria Externa Oeste. Apesar da diferenciação, as características construtivas, e consequentemente seus valores, são idênticas.

Para a inserção dos valores das propriedades térmicas dos componentes da envoltória é necessário acessar os parâmetros internos de cada elemento, que neste caso são os materiais que compõem a Alvenaria Externa Norte. O Revit tem como particularidade utilizar a condutividade térmica (λ) dos materiais para o cálculo da resistência térmica (R) e posteriormente a transmitância térmica (U), conforme figura 35.

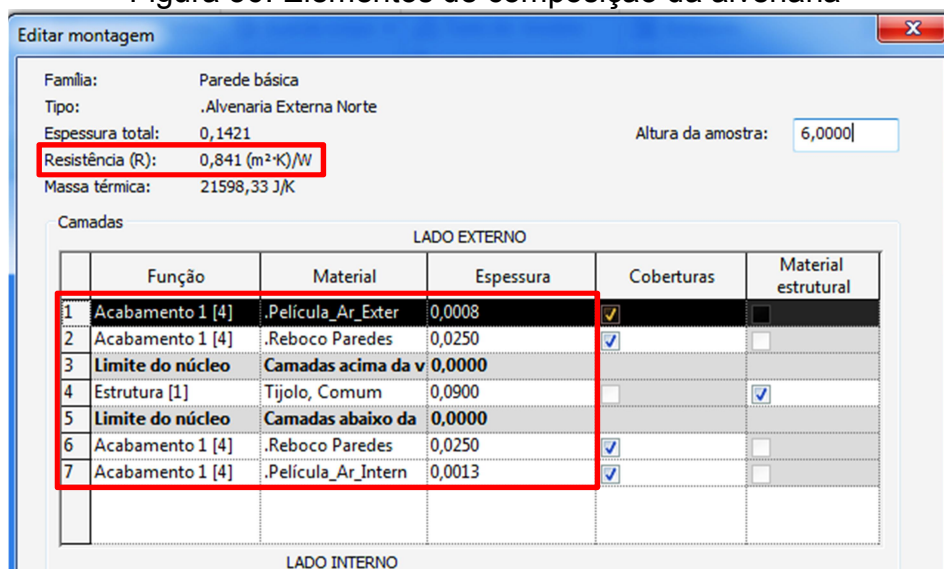
Figura 35: Condutividade térmica dos materiais



Fonte: Revit 2017 - adaptado pelo autor

Conforme a fórmula $R=e/\lambda$, todos os elementos precisam de uma espessura (e) para o cálculo de sua resistência, até mesmo as “Películas de Ar” externa e interna, que neste caso os valores definidos para espessura e condutividade térmica resultam no mesmo valor de resistência térmica aplicada pelo método prescrito. O valor da resistência total do componente é resultante do seu detalhamento construtivo no Revit (figura 36).

Figura 36: Elementos de composição da alvenaria



Fonte: Revit 2017 - adaptado pelo autor

A figura 37 apresenta as propriedades gerais da Parede Externa Norte sendo possível observar seus parâmetros e valores, os destacados são a função; o material estrutural; a transmitância térmica (U) e a resistência térmica (R).

Figura 37: Parâmetros das alvenarias externas

Propriedades de tipo

Família: Família do sistema: Parede básica Carregar...

Tipo: Alvenaria Externa Norte Duplicar... Renomear...

Parâmetros de tipo

Parâmetro	Valor
Construção	
Estrutura	Editar...
Virar nas inserções	Exterior
Virar nas extremidades	Nenhum
Largura	0,1421
Função	Exterior
Gráficos	
Padrão de preenchimento em escala de baixa resolução	Diagonal ascendente
Preenchimento de cor de escala de baixa resolução	Preto
Materiais e acabamentos	
Material estrutural	Tijolo, Comum
Estrutural	
Filter Tragend / Nichttragend	<input checked="" type="checkbox"/>
Propriedades analíticas	
Coeficiente de transferência de calor (U)	1,1889 W/(m²·K)
Resistência térmica (R)	0,8411 (m²·K)/W
Massa térmica	21598,3337 J/K
Absorção	0,158000
Rugosidade	3

Fonte: Revit 2017 - adaptado pelo autor

A cobertura é definida por laje simples de concreto armado e espessura total de 10cm. Conforme explicado, o processo de configuração da cobertura dentro do Revit é idêntico ao das alvenarias, desta forma, na figura 38 é possível verificar as propriedades da componente de vedação horizontal da envoltória, com destaque para a transmitância térmica (U) e resistência térmica (R).

Figura 38: Propriedades da cobertura

Propriedades de tipo

Família: Família do sistema: Telhado básico

Tipo: .Laje Impermeabilizada

Carregar... Duplicar... Renomear...

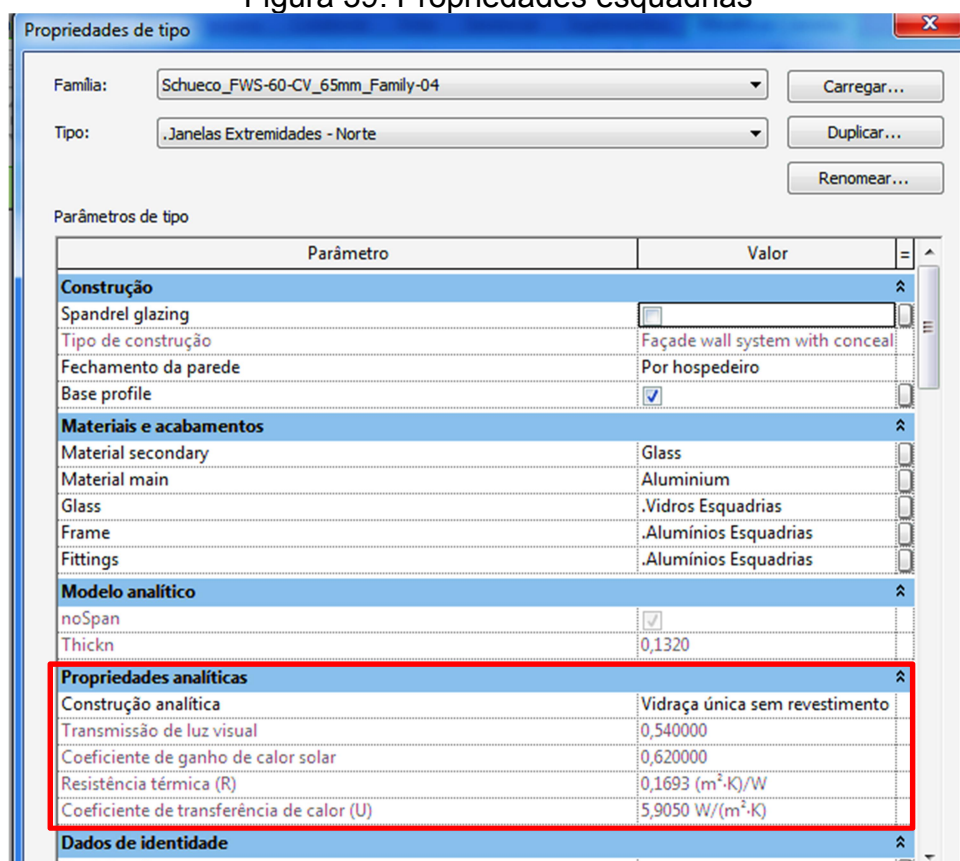
Parâmetros de tipo

Parâmetro	Valor
Construção	
Estrutura	Editar...
Espessura-padrão	0,1025
Gráficos	
Padrão de preenchimento em escala de baixa resolução	Preenchimento sólido
Preenchimento de cor de escala de baixa resolução	Branco
Propriedades analíticas	
Coeficiente de transferência de calor (U)	3,7433 W/(m²·K)
Resistência térmica (R)	0,2671 (m²·K)/W
Massa térmica	21367,9789 J/K
Absorção	0,158000
Rugosidade	3

Fonte: Revit 2017 - adaptado pelo autor

Em relação às esquadrias, o Revit possui um banco de dados pré-definidos de modelos oriundos da ASHRAE Handbook – Fundamentals 2005 que utiliza o valor de coeficiente de ganho de aquecimento solar (SHGC). Esse valor determina o ganho de calor em um determinado momento do dia, portanto, o ângulo de incidência do sol (AUTODESK, 2017). Desta forma, as esquadrias inseridas nos modelos farão somente composição nas fachadas caso não seja escolhida um modelo de “Construção analítica” dentro do parâmetro “Propriedades analíticas”, conforme observado na figura 39. A escolha do modelo teve como premissa as características e propriedades semelhantes aos modelos que fazem parte do Catálogo de Propriedades Térmicas e Óticas de Vidros Comercializados no Brasil (CB3E; ABIVIDRO, 2015).

Figura 39: Propriedades esquadrias



Fonte: Revit 2017 - adaptado pelo autor

Concluída a caracterização da envoltória do modelo referência a próxima etapa é realizar o mesmo procedimento para o modelo ajustado

5.3.2. Modelo Ajustado

Semelhante ao modelo referência, as características construtivas das variáveis de teste apresentadas na tabela 31 terão os valores de suas propriedades inseridas no seu arquivo do Revit e apresentadas passo a passo.

Tabela 31: Modelo ajustado - variáveis de teste e seus valores

Variáveis de teste	Modelo Ajustado	Valores
Fator Solar vidros das esquadrias	Esquadria simples com vidro 6mm reflexivo - 20% aço inoxidável vidro claro	FS = 0,31*
Componentes das paredes	Alvenaria 14 cm (Bloco concreto de 2 furos – 9x19x39cm; Reboco de 2,5cm)	R = 2,958 (m²K)/W U = 0,338 W/(m²K)
Componentes da Cobertura	Telhado vegetado (Laje maciça 10 cm com manta betuminosa, proteção mecânica, terra argilosa seca (40cm) e vegetação)	R = 1,036 (m²K)/W U = 0,965 W/(m²K)

*Valor oriundo do componente pré-definido do Revit

Fonte: Elaborado pelo autor

Da mesma forma que o modelo referência, as alvenarias do modelo ajustado foram identificadas de acordo com a sua posição: Alvenaria Externa Norte; Alvenaria Externa Sul; Alvenaria Externa Leste e Alvenaria Externa Oeste. A figura 40 apresenta os parâmetros do componente, que além da transmitância térmica (U), resistência térmica (R) e função, o destaque principal é o “Material estrutural” que caracteriza o elemento diferenciador em relação ao modelo referência, o bloco de concreto.

Figura 40: Parâmetros das alvenarias externas

Propriedades de tipo

Família: Família do sistema: Parede básica

Tipo: Alvenaria Externa Norte

Parâmetros de tipo

Parâmetro	Valor
Construção	
Estrutura	Editar...
Virar nas inserções	Exterior
Virar nas extremidades	Nenhum
Largura	0,1421
Função	Exterior
Gráficos	
Padrão de preenchimento em escala de baixa resolução	Diagonal ascendente
Preenchimento de cor de escala de baixa resolução	Preto
Materiais e acabamentos	
Material estrutural	Bloco Concreto
Estrutural	
Filter Tragend / Nichttragend	<input checked="" type="checkbox"/>
Propriedades analíticas	
Coefficiente de transferência de calor (U)	0,3381 W/(m²·K)
Resistência térmica (R)	2,9574 (m²·K)/W
Massa térmica	28521,4682 J/K
Absorção	0,158000
Rugosidade	3
Dados de identidade	

Fonte: Revit 2017 - adaptado pelo autor

A cobertura é o componente que sofreu a alteração mais substancial da envoltória do modelo ajustado em comparação com o modelo referência. O sistema adotado é o de cobertura vegetativa, no entanto, mantém a laje de concreto armado com espessura de 10 cm como o modelo referência, mas agrega 40 cm de terra argilosa e 10 cm de grama, conforme pode ser observado na figura 41.

Figura 41: Elementos da cobertura vegetativa

Editar montagem

Família: Telhado básico
 Tipo: .Cobertura verde
 Espessura total: 0,6025 (Padrão)
 Resistência (R): 1,036 (m²·K)/W
 Massa térmica: 71899,80 J/K

Camadas

	Função	Material	Espessura	Coberturas	Variável
1	Acabamento 2 [5]	.Película_Ar_Ext	0,0008		
2	Acabamento 1 [4]	.Grama	0,1000		
3	Substrato [2]	.Terra Argilosa	0,4000		
4	Limite do núcleo	Camadas acima da v	0,0000		
5	Estrutura [1]	.Concreto Lajes	0,1000		
6	Limite do núcleo	Camadas abaixo da	0,0000		
7	Acabamento 2 [5]	.Película_Ar_Inter	0,0017		

Inserir Excluir Acima Abaixo

Fonte: Revit 2017 - adaptado pelo autor

A adoção da espessura de 10 cm para o elemento grama é totalmente representativa, já que o Anexo V do RTQ-C não apresenta qualquer dimensão. Conforme observado no método prescritivo, o elemento cobertura vegetal não compõe o cálculo da resistência térmica e da transmitância térmica, sendo estes valores demonstrados na figura 42.

Figura 42: Parâmetros cobertura vegetativa

Propriedades de tipo

Família: Família do sistema: Telhado básico
 Tipo: .Cobertura verde

Carregar...
 Duplicar...
 Renomear...

Parâmetros de tipo

Parâmetro	Valor
Construção	
Estrutura	Editar...
Espessura-padrão	0,6025
Gráficos	
Padrão de preenchimento em escala de baixa resolução	Preenchimento sólido
Preenchimento de cor de escala de baixa resolução	Branco
Propriedades analíticas	
Coeficiente de transferência de calor (U)	0,9649 W/(m²·K)
Resistência térmica (R)	1,0364 (m²·K)/W
Massa térmica	71899,8004 J/K
Absorção	0,158000
Rugosidade	3
Dados de identidade	

Fonte: Revit 2017 - adaptado pelo autor

Assim como o modelo referência, a escolha das esquadrias também foi realizada dentre as opções pré-definidas disponíveis no Revit (figura 43) e também tem como premissa as características e propriedades semelhantes aos modelos que fazem parte do Catálogo de Propriedades Térmicas e Óticas de Vidros Comercializados no Brasil (CB3E; ABIVIDRO, 2015).

Figura 43: Propriedades esquadrias

The screenshot shows the 'Propriedades de tipo' (Type Properties) window in Revit. The 'Família' (Family) is 'Schueco_FWS-60-CV_65mm_Family-04' and the 'Tipo' (Type) is 'Janelas Extremidades - Norte'. The 'Parâmetros de tipo' (Type Parameters) table is as follows:

Parâmetro	Valor
Construção	
Spandrel glazing	<input type="checkbox"/>
Tipo de construção	Façade wall system with conceal
Fechamento da parede	Por hospedeiro
Base profile	<input checked="" type="checkbox"/>
Materiais e acabamentos	
Material secondary	Glass
Material main	Aluminium
Glass	.Vidros Esquadrias
Frame	.Alumínios Esquadrias
Fittings	.Alumínios Esquadrias
Modelo analítico	
noSpan	<input checked="" type="checkbox"/>
Thickn	0,1320
Propriedades analíticas	
Construção analítica	Vidraça única reflexiva - 1/4 pol
Transmissão de luz visual	0,200000
Coeficiente de ganho de calor solar	0,310000
Resistência térmica (R)	0,1693 (m²·K)/W
Coeficiente de transferência de calor (U)	5,9050 W/(m²·K)
Dados de identidade	

Fonte: Revit 2017 - adaptado pelo autor

Concluída a caracterização dos modelos de estudo, Referência e Ajustado, onde os componentes das envoltórias receberam todas as informações provenientes dos cálculos do método prescritivo, a próxima etapa, anterior à exportação dos arquivos nos formatos gbXML e IFC, é a criação dos modelos de energia.

5.4. CRIAÇÃO DOS MODELOS DE ENERGIA

Segundo a Autodesk (2017), o modelo analítico de energia é uma forma geométrica utilizada pelos motores de simulação de energia como DOE 2.2 e EnergyPlus. O modelo de energia é uma abstração da forma e do layout da construção em uma

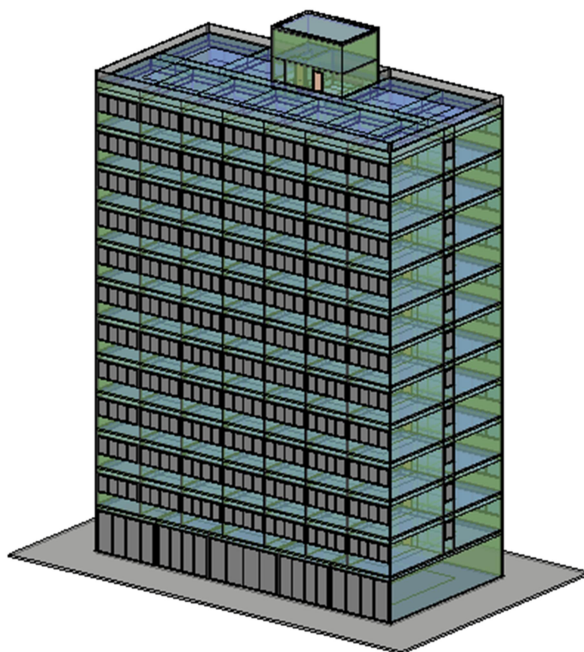
rede computacional, onde captura todos os principais caminhos e os processos de transferência de calor por toda a edificação.

Com base no esquema gbXML, o modelo analítico de energia tem três componentes principais (AUTODESK, 2017):

- Os Espaços – são volumes discretos de ar (massas) que lidam com perdas ou ganhos de calor. Essas trocas são resultados de processos internos como ocupação; iluminação; equipamentos e AVAC, assim como a troca de calor com outros espaços e com o ambiente externo.
- As Superfícies – são os caminhos de transferência de calor entre os espaços, incluindo superfícies entre espaços internos e o ambiente externo.
- As zonas – são grupos de espaços utilizados para constituir semelhanças entre os espaços. Por exemplo, representar espaços com a mesma orientação, função ou serviço pelo sistema AVAC.

Visualmente os modelos analíticos de energia são idênticos (figura 44), tanto para o modelo referência quanto para o ajustado, contudo, como são criados a partir dos modelos existentes e suas informações, são na realidade diferentes e únicos.

Figura 44: Modelo de energia



Fonte: Revit 2017 - adaptado pelo autor

O Revit utiliza o modelo de energia criado para exportar a edificação; se conectar ao Green Building Studio (GBS), com um único comando, para enviar os parâmetros dos modelos e executar a simulação energética; e também realizar uma análise de cargas de resfriamento e aquecimento dos espaços. A Autodesk disponibiliza o plugin Insight 360 para instalar no Revit, este recurso, semelhante ao GBS, também possibilita o envio do modelo analítico de energia para execução da simulação. O quadro 24 apresenta a relação dos modelos, os padrões de compartilhamento e os programas BEM.

Quadro 24: Relação dos modelos com os programas BEM

Modelos	Padrão	Programas BEM
Referência e Ajustado	Direto/Plugin	GBS e Insight 360
	gbXML	GBS; Design Builder; EnergyPlus (OpenStudio); IES-VE
	IFC	EnergyPlus (OpenStudio); IES-VE

Fonte: Elaborado pelo autor

Concluídas todas as configurações dos modelos referência e ajustado, estes serão exportados com extensões gbXML e IFC para a avaliação da interoperabilidade com as ferramentas BEM através das simulações energéticas.

5.5. INTEROPERABILIDADE E SIMULAÇÕES ENERGÉTICAS NOS PROGRAMAS BEM

As interoperabilidades entre o Revit e os programas BEM foram realizadas de três formas: 1) direta – através da comunicação direta com o GBS e o Insight; 2) exportação – são criados arquivos com extensão gbXML e IFC que serão abertos nos programas de destino e 3) indireta – é necessário um programa intermediário para a criação do arquivo padrão, neste caso foi utilizado o GBS na exportação dos arquivos INP e IDF, para o eQUEST e EnergyPlus respectivamente, pode ser considerada uma interoperabilidade de segundo nível.

Os arquivos criados foram abertos¹⁰ ou importados¹¹ atendendo às particularidades de cada programa BEM, sendo definidos três quesitos que serão observados:

¹⁰ Os arquivos são abertos quando possuem extensão nativa do programa de destino, como por exemplo, o arquivo IDF do EnergyPlus.

- Importação e/ou abertura – total, parcial ou não realizada;
- Compartilhamento – forma e informações ou somente a forma;
- Simulações – realizadas ou não realizadas.

O quadro 25 expõe a matriz de interoperabilidade entre as ferramentas BIM e BEM, relacionando o tipo de arquivo, a forma de compartilhamento e os programas de simulação energética utilizados. Tem como objetivo apresentar de forma direta como ocorrerá a interação dos arquivos dos modelos com as ferramentas BEM.

Quadro 25: Matriz de interoperabilidade BIM e BEM

Modelos	Ferramentas BEM	Interoperabilidade com o Revit	Extensões dos arquivos	Interação com os arquivos
Referência e Ajustado	GBS	Direta - Revit	Não se aplica	Não se aplica
		Exportação	gbXML	Importação
	Insight	Direta - Revit	Não se aplica	Não se aplica
		Exportação	gbXML e IFC	Importação
	OpenStudio	Indireta – GBS e Insight	IDF	Abrir
		Indireta – GBS e Insight	IDF	Abrir
	EnergyPlus	Indireta – GBS e Insight	IDF	Abrir
	eQUEST	Indireta – GBS e Insight	INP	Abrir
	DesignBuilder	Exportação	gbXML	Importação
	IES-VE	Exportação	gbXML e IFC	Importação

Fonte: Elaborado pelo autor.

A matriz de interoperabilidade busca facilitar a compreensão do procedimento empregado e o grau de atendimento aos quesitos definidos que serão descritos para cada ferramenta BEM empregada.

5.5.1. Green Building Studio – GBS

O GBS é uma ferramenta de simulação energética de edificações baseada na nuvem¹² que utiliza o DOE-2.2 como mecanismo de simulação e a sua principal forma de interoperabilidade com as ferramentas BIM é por meio da extensão gbXML. Particularmente, também por ser um programa da mesma fabricante do Revit, a Autodesk®, é possível uma interação direta entre as ferramentas. Desta

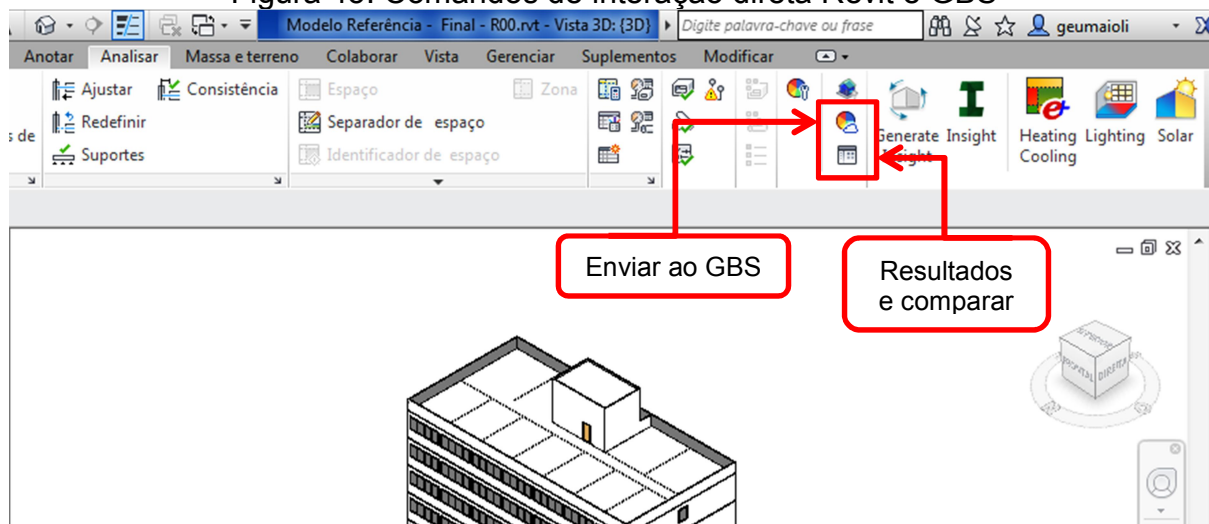
¹¹ Os arquivos são importados quando possuem extensões suportadas pelo programa de destino, por exemplo, o arquivo gbXML para o DesignBuilder e o IES-VE.

¹² A nuvem é uma rede de servidores remotos que são conectados e operam como um único ecossistema. Estes servidores são responsáveis por armazenar e gerenciar dados, executar aplicativos ou fornecer conteúdos ou serviços. Fonte: <<https://azure.microsoft.com/pt-br/overview/what-is-the-cloud/>>. Acessado em: 29/01/2018.

forma, a interoperabilidade com o GBS foi avaliada tanto direta quanto por exportação, esta última através da extensão gbXML.

Inicialmente será abordada a forma de interação direta entre o Revit e o GBS. Esta interação somente ocorre após a criação do modelo analítico de energia no Revit e, como já apresentado, esta é a última etapa do processo de criação do modelo dentro da ferramenta do BIM para a simulação energética da edificação. O modelo de energia é enviado diretamente ao GBS para a simulação, pode ser acompanhado e também comparado com resultados de outras simulações já executadas (figura 45).

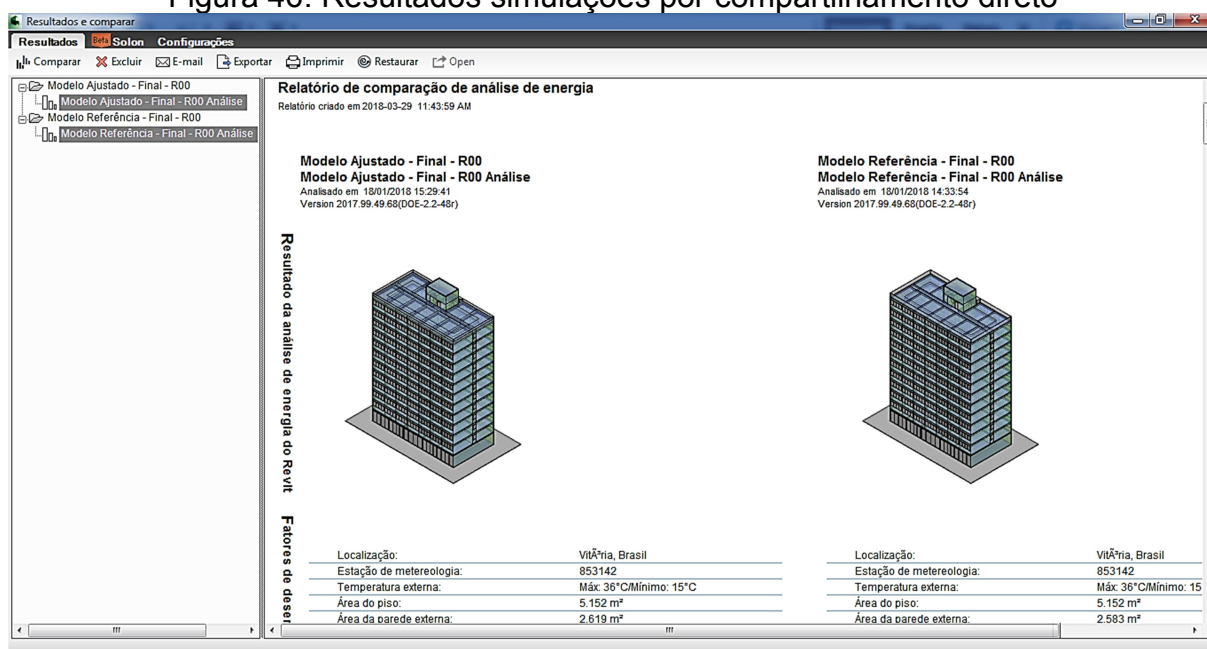
Figura 45: Comandos de interação direta Revit e GBS



Fonte: Revit 2017 - adaptado pelo autor

A simulação desta forma é realizada sem qualquer interação humana, sendo totalmente automatizada, permitindo somente verificar os resultados através da janela acessada pelo Revit por intermédio do comando “Resultados e comparar” (figura 46).

Figura 46: Resultados simulações por compartilhamento direto



Fonte: Revit 2017 - adaptado pelo autor

O segundo método para realizar a simulação no GBS é através do carregamento do arquivo gbXML exportado pelo Revit na nuvem onde o programa está hospedado. O acesso ao programa é possível somente por intermédio de um navegador da internet como o *Google Chrome*, *Internet Explorer* ou *Mozilla Firefox*, e também é necessário que o usuário possua um cadastro.

Após seguir as etapas de configurações exigidas pela ferramenta, o arquivo gbXML é carregado e a simulação executada, os resultados das simulações ficam disponíveis para consultas e possíveis adequações permitidas pela ferramenta. Como a interoperabilidade do GBS e o Revit ocorre de duas formas, direta e por exportação, as simulações de ambos permanecem acessíveis (figura 47).

Figura 47: Simulações realizadas pelo GBS

Dashboard Name	Description	Date Created	Projects Included	Energy Use Intensity (EUI)
Modelo Ajustado-Final-R00-Revit		1/18/2018	Modelo Ajustado - Final - R01 - CE	
Modelo Referência-Final-R00-Revit		1/18/2018	Modelo Referência - Final - R00 - CE	
Modelo Ajustado-Final-R00-GBS		1/18/2018	Modelo Ajustado - Final - R00	
Modelo Referência-Final-R00-GBS		1/18/2018	Modelo Referência - Final - R00	

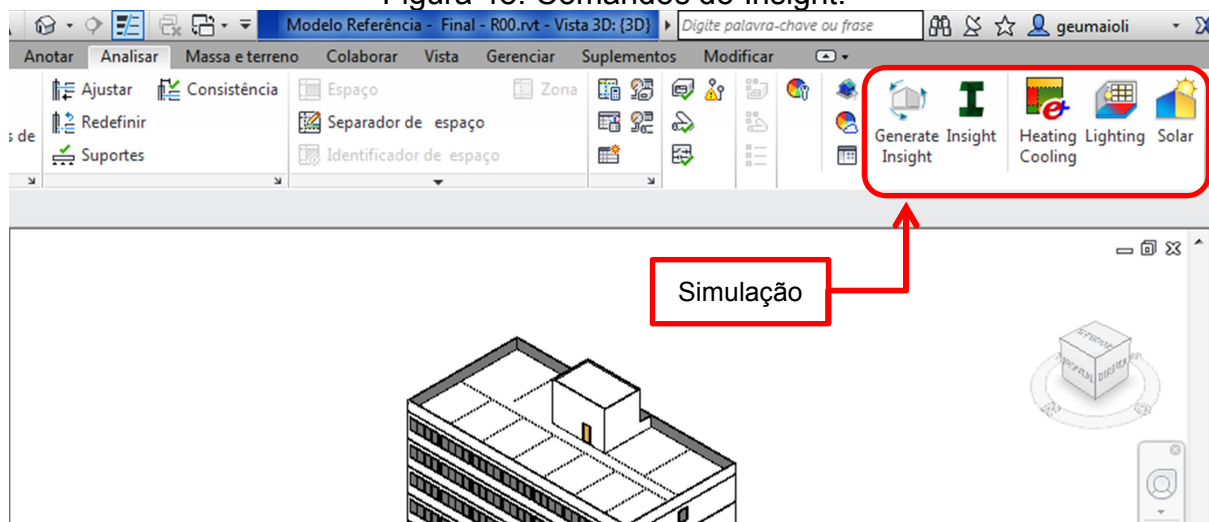
Fonte: <www.gbs.autodesk.com>, 2018. Acessado em: 29/01/2018.

A exportação dos arquivos IDF e INP teve como premissa a correta execução das simulações dos modelos gbXML em questão, caso ocorresse inconsistência ou falha nas simulações seriam realizados os ajustes necessários para a correta execução e posterior exportação para o EnergyPlus e eQUEST.

5.5.2. Insight

O Insight também é uma ferramenta de simulação energética baseada na nuvem da Autodesk®, utiliza o DOE-2.2 como mecanismo para a análise de eficiência energética e o EnergyPlus para o cálculo das cargas de resfriamento e aquecimento das edificações. A interoperabilidade com o Revit é direta através do plugin disponibilizado pela fabricante que quando instalado no Revit habilita os comandos no menu suspenso Analisar. Seguindo procedimentos semelhantes ao GBS, após a criação do modelo analítico de energia no Revit, este é enviado ao Insight para a simulação energética da edificação (figura 48).

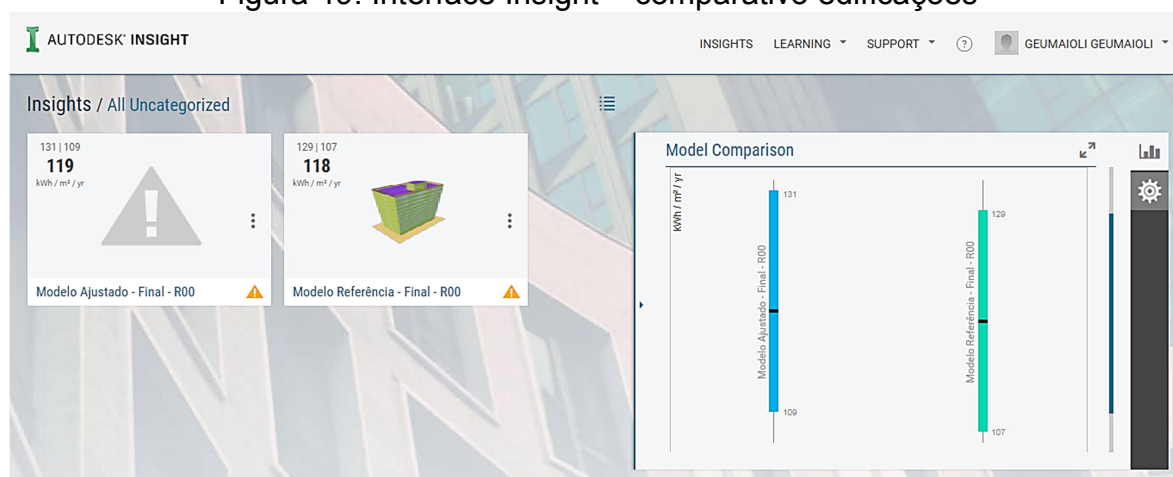
Figura 48: Comandos do Insight.



Fonte: Revit 2017 - adaptado pelo autor

O acesso aos resultados da simulação realizada pelo Insight é, assim como o GBS, por intermédio de navegadores de internet à escolha do usuário, sendo necessário cadastro e uso de login e senha. A ferramenta disponibiliza, além do consumo energético por área, comparação entre edificações relativas a estes consumos energéticos, possibilitando avaliar os ganhos ou perdas das propostas projetadas, conforme observado na figura 49. O Insight também pode ser utilizado para interoperabilidade indireta, sendo criados arquivos IDF e INP dos modelos simulados que serão abertos diretamente no EnergyPlus e eQUEST, respectivamente.

Figura 49: Interface Insight – comparativo edificações



Fonte: < www.insight.autodesk.com >, 2018. Acessado em: 29/01/2018.

A principal particularidade do Insight é o fato de ser compatível somente com o Revit. Justamente por ser um plugin não há interação com outros programas BIM,

assim como, não possibilita a interoperabilidade por meio de exportação através das extensões gbXML e IFC com as ferramentas BEM.

5.5.3. EnergyPlus

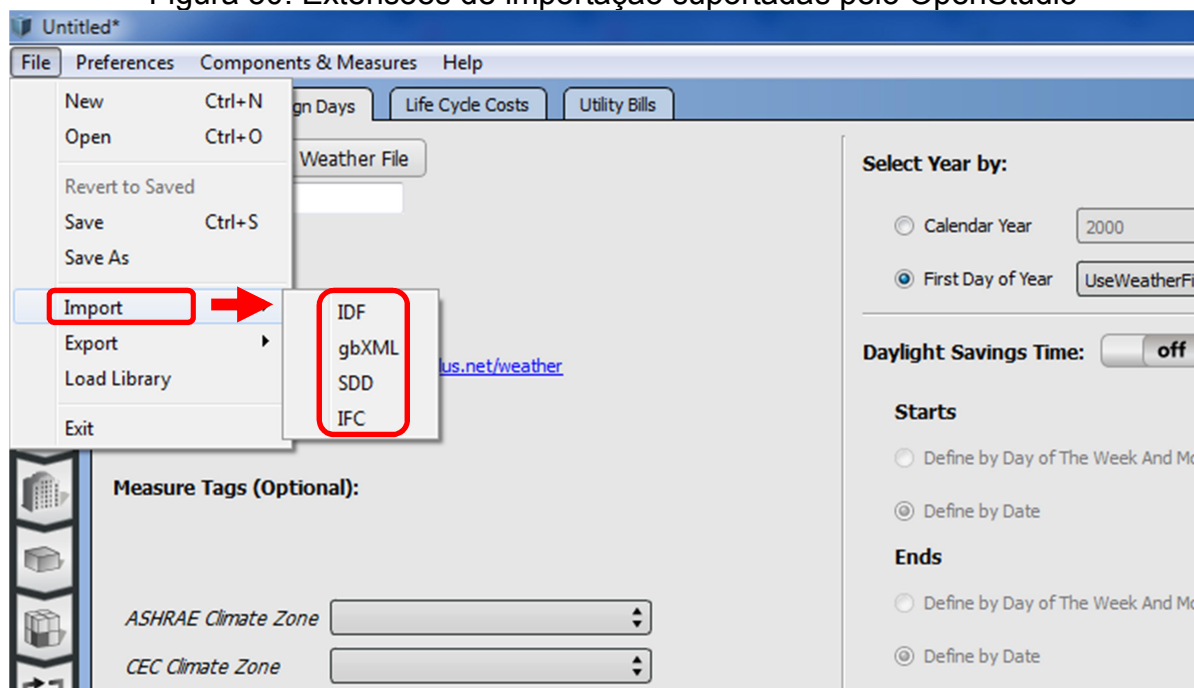
O EnergyPlus é um mecanismo de simulação de eficiência da edificação utilizado por várias ferramentas BEM disponíveis no mercado, tanto pagas quanto gratuitas, propiciando uma interface mais amigável ao usuário. No entanto as simulações também poder ser realizadas diretamente no EnergyPlus, mesmo não possuindo uma interface amigável, a versão utilizada nesta pesquisa é a 8.5 de 2016.

A interoperabilidade do EnergyPlus com os programas BIM depende de como será utilizado. Quando atua somente como mecanismo de simulação para as ferramentas BEM o compartilhamento poderá ocorrer através das extensões gbXML ou IFC, cabendo ao fabricante da ferramenta em questão definir qual utilizará. Já para o uso e simulações diretamente no EnergyPlus, a interoperabilidade se dá através da sua extensão padrão, a IDF. Neste caso, como o Revit não exporta arquivos IDF fez-se necessário utilizar o GBS e o Insight para converter os arquivos gbXML em IDF.

Inicialmente utilizou-se a ferramenta OpenStudio como interface gráfica, desenvolvida por um consórcio de laboratórios tendo com principais o *Lawrence Berkeley National Lab* (LBNL) da Universidade de Berkeley/CA e o *National Renewable Energy Lab* (NREL) do Departamento de Energia dos EUA (DOE), foi criada especificamente para o EnergyPlus, também desenvolvido pelos mesmos laboratórios.

Segundo as especificações o OpenStudio suporta a importação de arquivos IDF, gbXML e IFC (figura 50), além de possuir um plugin para o SketchUP 3D da empresa Trimble. No entanto, durante a etapa de realização das simulações dos modelos Referência e Ajustado o programa não importou nenhum dos arquivos gbXML e IFC exportados pelo Revit ou mesmo os arquivos IDF originados do GBS.

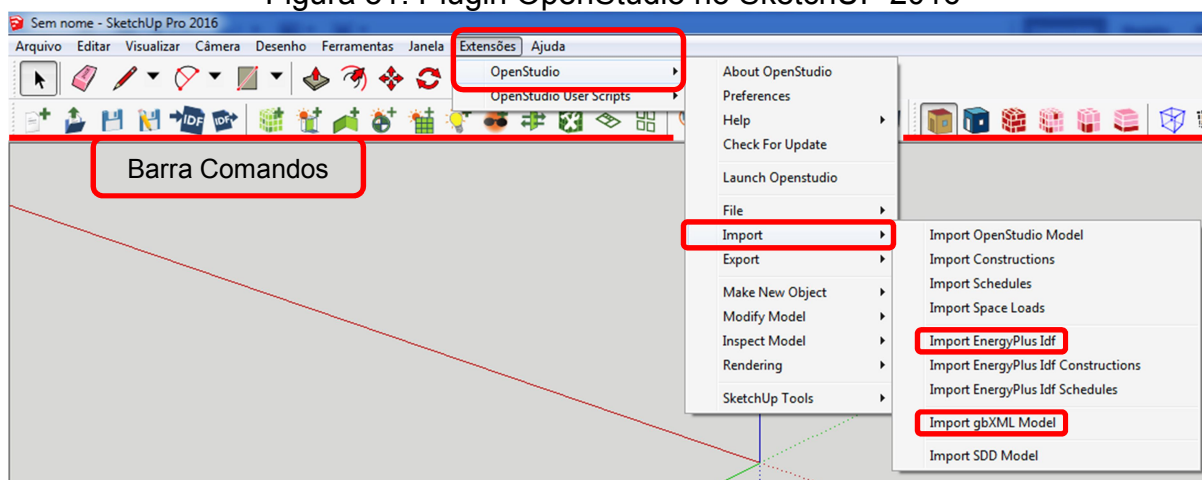
Figura 50: Extensões de importação suportadas pelo OpenStudio



Fonte: OpenStudio 2.0, 2016 - adaptado pelo autor

Em virtude do fato do OpenStudio não ter importado os arquivos IDF, gbXML e IFC para simulação, buscou-se como alternativa o uso do plugin para o programa de modelagem 3D SketchUP 2016 da Trimble. A instalação do OpenStudio disponibiliza automaticamente o plugin para uso no SketchUP, criando barras de comando e o menu para acesso de outras funções como por exemplo, a importação de arquivos IDF e gbXML (figura 51).

Figura 51: Plugin OpenStudio no SketchUP 2016

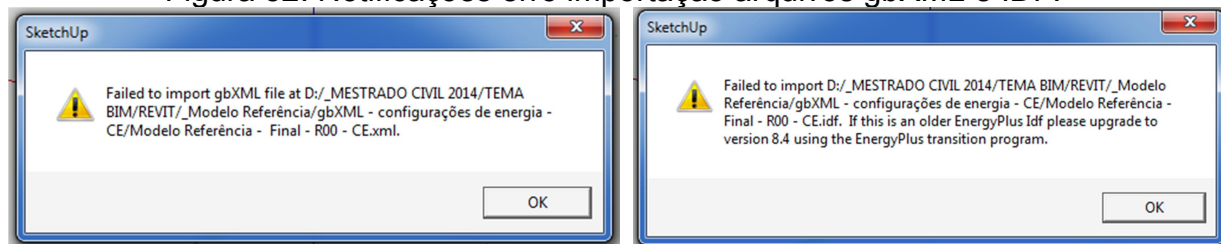


Fonte: SketchUP 2016 – adaptado pelo autor.

No entanto, todas as tentativas de importar os arquivos gbXML e IDF através do plugin não obtiveram sucesso conforme as notificações da figura 52. Em particular a

mensagem relacionada ao arquivo IDF informa que se a versão utilizada fosse anterior a 8.4 era necessário atualizá-la. Mesmo atendendo à notificação e sendo utilizado o aplicativo *IDF Version Updater* do EnergyPlus para ajustar a versão, surgia a mesma notificação.

Figura 52: Notificações erro importação arquivos gbXML e IDF.



Fonte: SketchUP 2016 – adaptado pelo autor.

Desta forma, não foi possível realizar as simulações para a análise de eficiência energética dos modelos Referência e Ajustado no EnergyPlus em conjunto com a interface gráfica OpenStudio, tanto diretamente com o programa como por intermédio do plugin para o modelador 3D SketchUP da Trimble.

Esgotadas as alternativas determinadas nesta pesquisa para a realização das simulações no EnergyPlus com a utilização de uma interface gráfica amigável, a interoperabilidade fez-se direto com a ferramenta BEM. Neste processo é obrigatório o uso dos arquivos IDF, uma vez que o programa não interage com outros tipos de extensões.

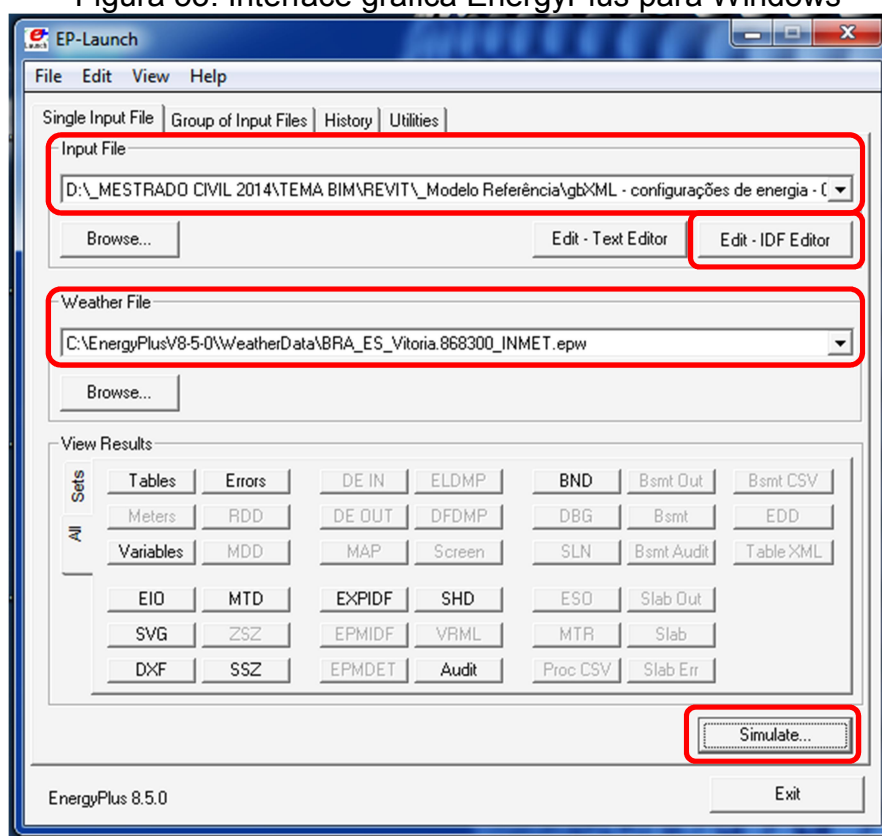
A interface original do EnergyPlus não permite uma interação fluída entre o usuário e o programa, e ainda há uma particularidade da ferramenta, o EnergyPlus não é somente um programa, mas sim um pacote de programas necessários para a execução de uma simulação de eficiência energética de uma edificação. O pacote é composto por seis aplicativos ao todo, onde os utilizados nas simulações desta pesquisa foram:

- IDF Editor – editor que lê os IDFs e permite a criação e revisão de arquivos IDF;
- IDF Version Updater – atualizador de versões IDF que auxiliam os usuários na conversão de arquivos com versões antigas para versões atuais;
- EP-Launch – interface gráfica do EnergyPlus para o sistema operacional Windows.

Conforme observado na figura 53, o EP-Launch permite uma série de interações para a execução das simulações no EnergyPlus, que para esta pesquisa foram utilizadas: 1) Input File – comando para escolha do arquivo IDF que será simulado; 2) *Weather File* – inserção do arquivo com os dados climáticos de Vitória/ES; 3) Edit-IDF Editor – comando para editar e averiguar as informações contidas no arquivo IDF e 4) Simulate – comando para iniciar a simulação da edificação contida no arquivo IDF.

O IDF Editor permitiu verificar as informações contidas nos arquivos IDFs dos modelos Referência e Ajustados utilizados nas simulações, assim como, definir quais informações serão contempladas nos relatórios com os resultado das simulações.

Figura 53: Interface gráfica EnergyPlus para Windows

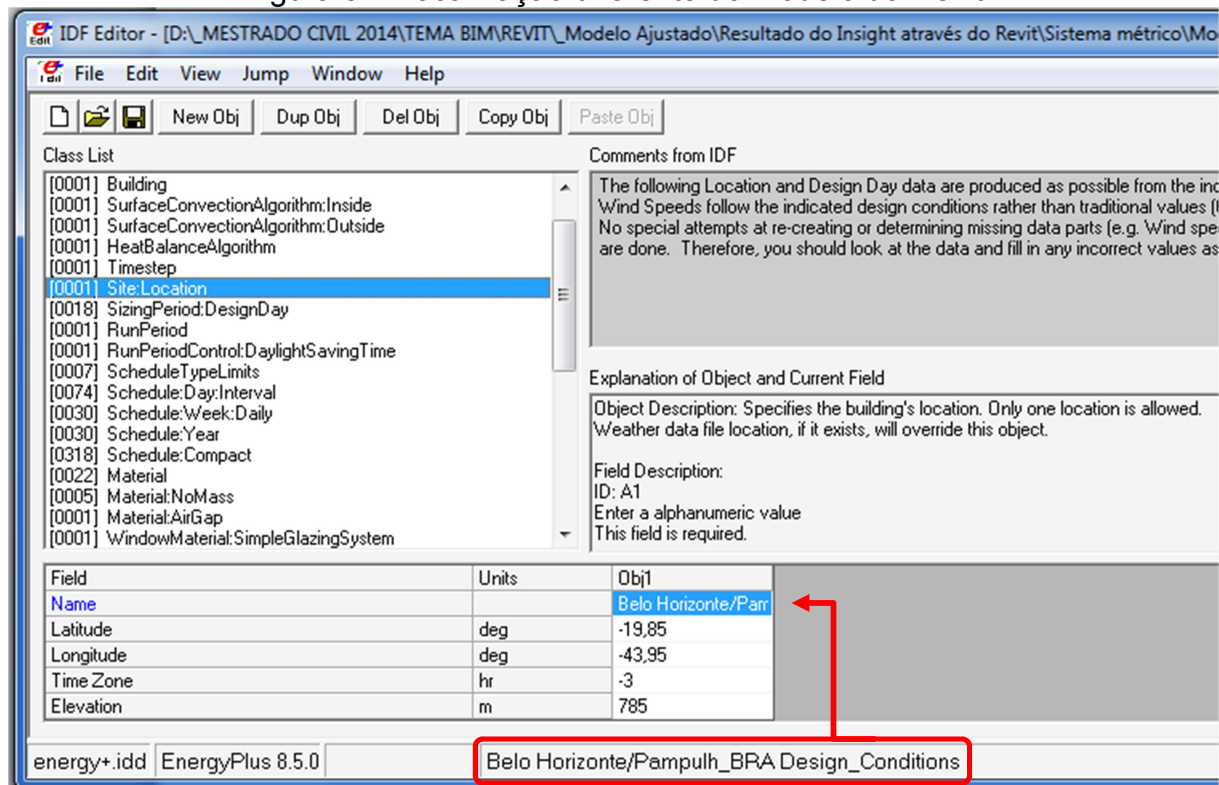


Fonte: EnergyPlus, 2016 – adaptado pelo autor

Foi observado no arquivo IDF dos modelos uma alteração na localização definida no modelo analítico de energia do Revit. A localização original é a cidade de Vitória/ES e no EnergyPlus consta em todas as simulações a cidade de Belo Horizonte/MG,

sendo esta a principal não conformidade e a impossibilidade de adequação pelo usuário (figura 54).

Figura 54: Localização diferente do modelo do Revit



Fonte: EnergyPlus, 2016 – adaptado pelo autor

As propriedades térmicas dos materiais que compõem as alvenarias e cobertura também estão listadas e permitem ajustes caso necessário, como a pesquisa não possui a finalidade de editar os dados e sim verificar se foram compartilhados, na figura 55 foram destacados em vermelho os materiais das alvenarias e em azul os materiais da cobertura, que neste caso são referentes ao modelo Ajustado, às demais propriedades são provenientes dos materiais utilizados pelo Revit nos seus componentes e famílias padrões. Os materiais destacados são:

- Obj3 – Película de ar externa;
- Obj4 – Rebocos internos e externos;
- Obj6 – Película de ar interna;
- Obj9 – Bloco de concreto;
- Obj7 – Película de ar externa;
- Obj12 – Laje de concreto;
- Obj14 – Terra argilosa;

- Obj15 – Película de ar interna.

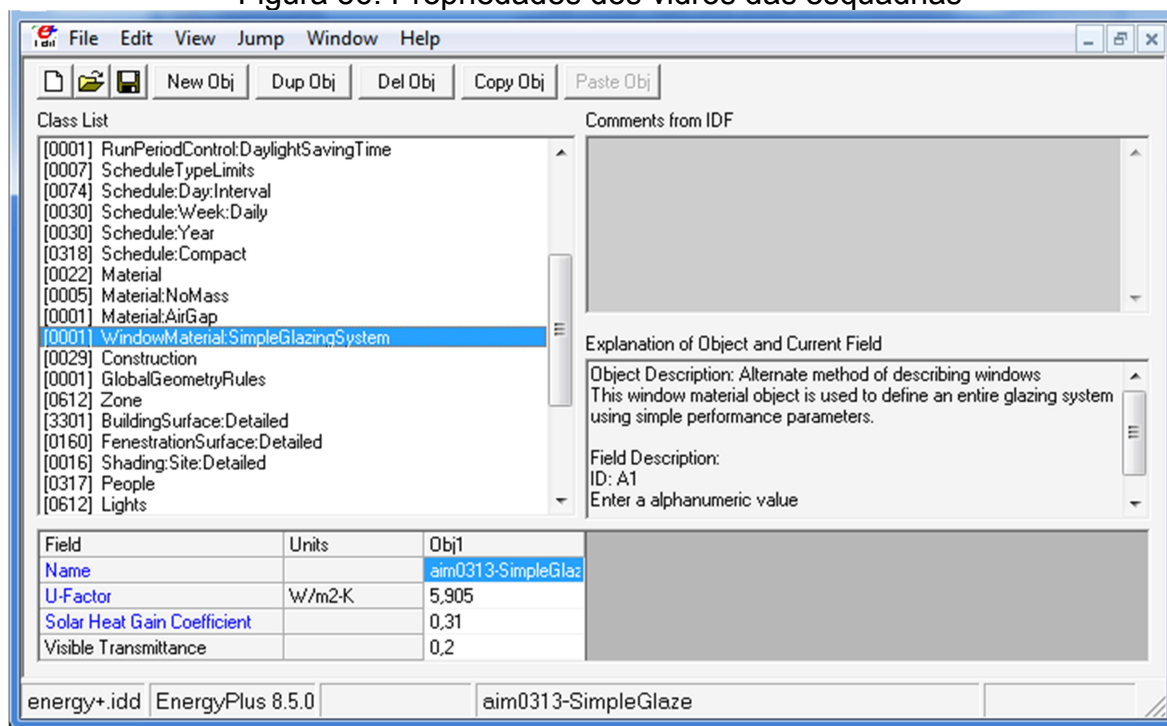
Figura 55: Materiais da envoltória e suas propriedades térmicas.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	Obj10	Obj11	Obj12	Obj13	Obj14	Obj15
Name		aim0019	aim0032	aim0045	aim0052	aim0055	aim0066	aim0078	aim0088	aim0110	aim0235	aim0242	aim0249	aim0262	aim0297	aim0305
Roughness		Rough	Rough	Rough	Rough	Rough	Rough	Rough	Rough	Rough	Rough	Rough	Rough	Rough	Rough	Rough
Thickness	m	0,2	0,15	0,0008	0,025	0,09	0,0013	0,0008	0,0376	0,09	0,05	0,004	0,1	0,03	0,4	0,0017
Conductivity	W/m-K	1,75	1,75	0,02	1,15	0,1434	0,01	0,02	0,15	0,0328	1750	0,23	1,75	0,35	0,52	0,01
Density	kg/m3	2300	2300	1,2	2000	1600	1,2	1,2	608	2300	2300	1100	2300	900	1300	1,2
Specific Heat	J/kg-K	1000	1000	1003,5	1000	920	1003,5	1003,5	1630	1000	1000	1460	1000	840	1046	1003,5
Thermal Absorptance		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Solar Absorptance		0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Visible Absorptance		0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75

Fonte: EnergyPlus, 2016 – adaptado pelo autor

Da mesma forma que os materiais das alvenarias e cobertura foram averiguados, o outro componente da envoltória, os vidros das esquadrias, também tiveram atenção devida. Na figura 56 é possível verificar as propriedades dos vidros da tipologia de esquadria escolhida dentre as opções existentes no Revit.

Figura 56: Propriedades dos vidros das esquadrias



Fonte: EnergyPlus, 2016 – adaptado pelo autor

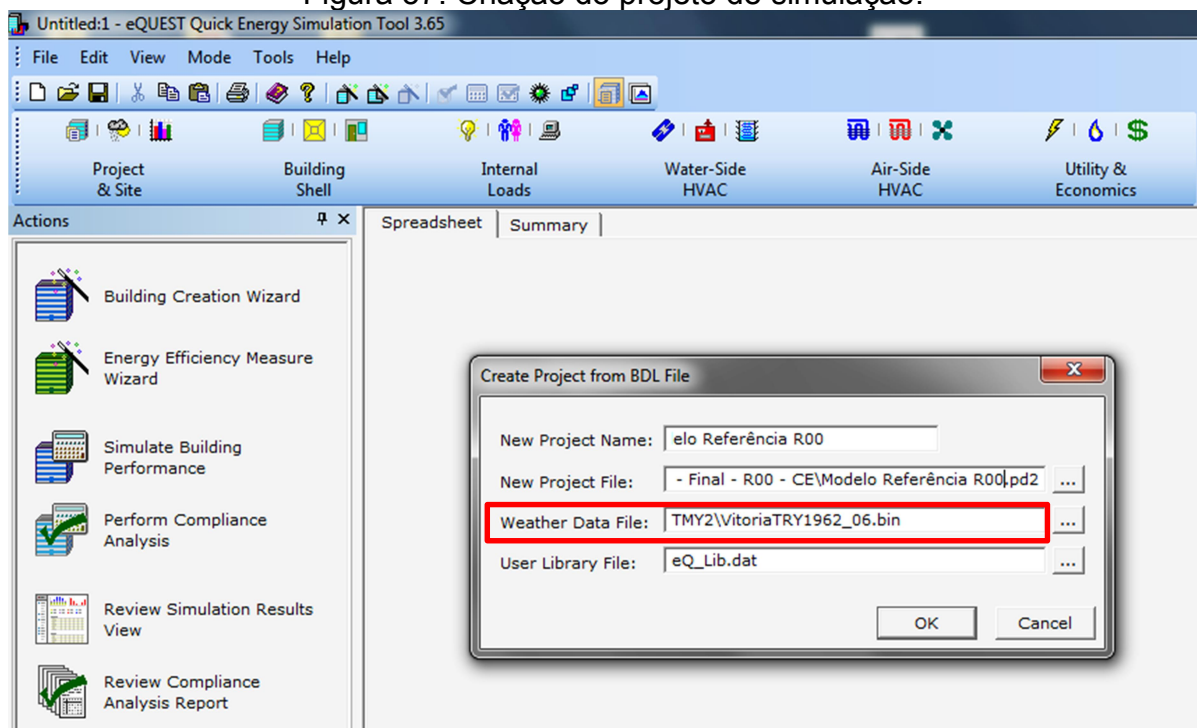
Tais conferências foram realizadas nos arquivos IDF dos modelos Referência e Ajustado, oriundos dos arquivos gbXML exportados pelo Revit e simulados no Green Building Studio e no Insight. Finalizada a conferência foram realizadas as simulações no EnergyPlus.

5.5.4. eQUEST

O eQUEST é uma ferramenta BEM gratuita que utiliza como mecanismo de simulação o DOE-2.2. O programa possui uma interface gráfica mais amigável e intuitiva comparado com o EnergyPlus e suporta arquivos com extensão INP que, assim como os arquivos IDF, foram originados do Green Building Studio e do Insight.

Desta forma, os arquivos INP dos modelos Referência e Ajustado foram abertos seguindo as etapas pré-definidas do programa para a criação do projeto de simulação energética. É destacada a solicitação do arquivo climático da localidade onde a edificação está implantada, neste caso em Vitória/ES, na etapa inicial de configuração (figura 57). No entanto, não está relacionada e não garante a leitura da informação da localização da edificação presente no arquivo gbXML exportado do Revit.

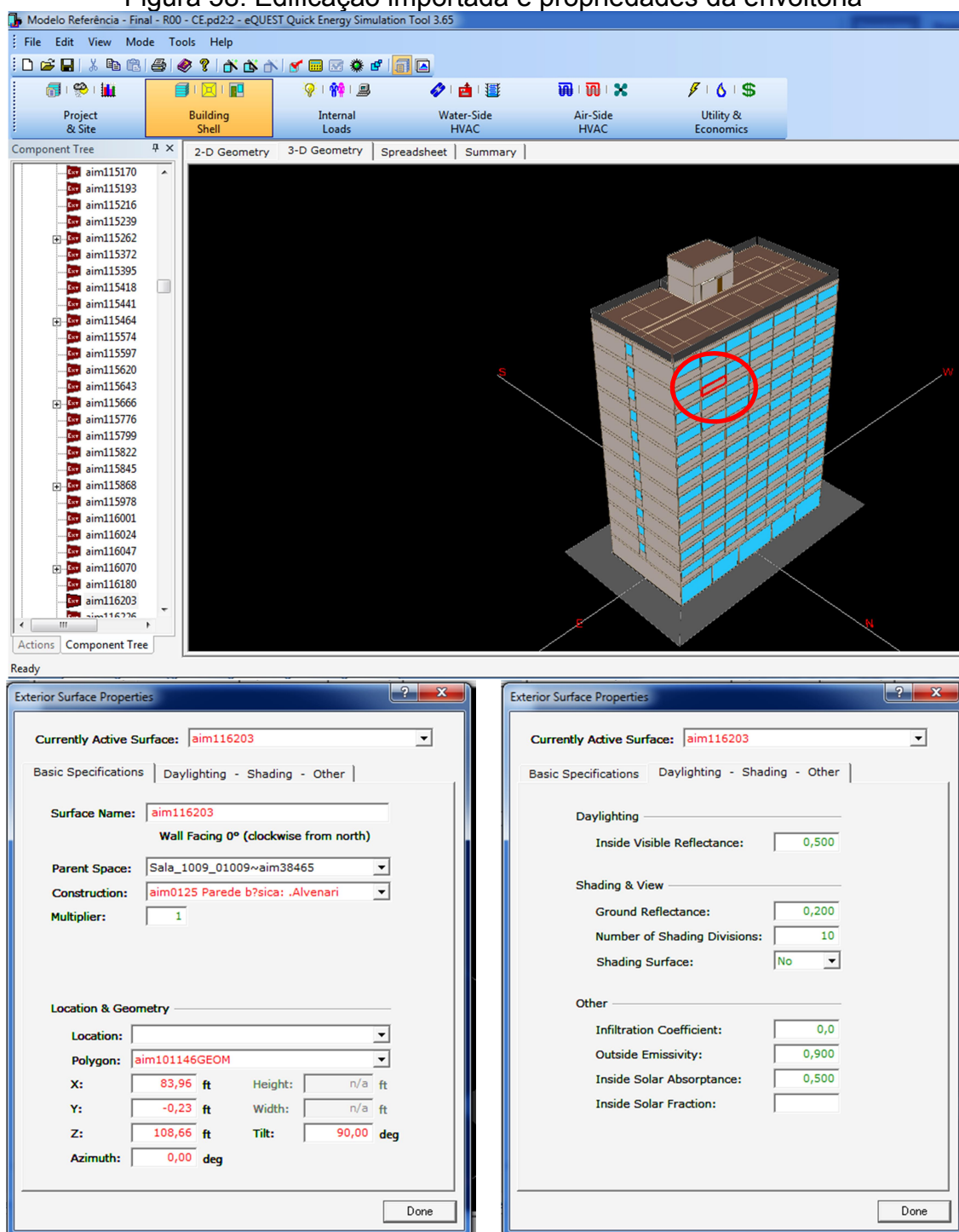
Figura 57: Criação do projeto de simulação.



Fonte: eQUEST, 2016 – adaptado pelo autor

O arquivo foi carregado com sucesso e a edificação pode ser visualizada dentro do programa, contudo, quando a alvenaria norte é selecionada, ou melhor, quando uma parte da alvenaria norte é selecionada, já que está desmembrada em vários pedaços, na janela de suas propriedades não constam as propriedades térmicas de seus materiais individuais ou mesmo do conjunto como um todo, semelhante ao calculado no método prescritivo e posteriormente configurado no Revit (figura 58).

Figura 58: Edificação importada e propriedades da envoltória



Fonte: eQUEST, 2016 – adaptado pelo autor

Desta forma, a falta das informações necessárias para as simulações impossibilitou a análise energética das edificações, pois, quando iniciado o processo de simulação ocasionava o travamento do programa. Não há possibilidade de afirmar que a perda das informações está relacionada com o procedimento de criação dos arquivos INP,

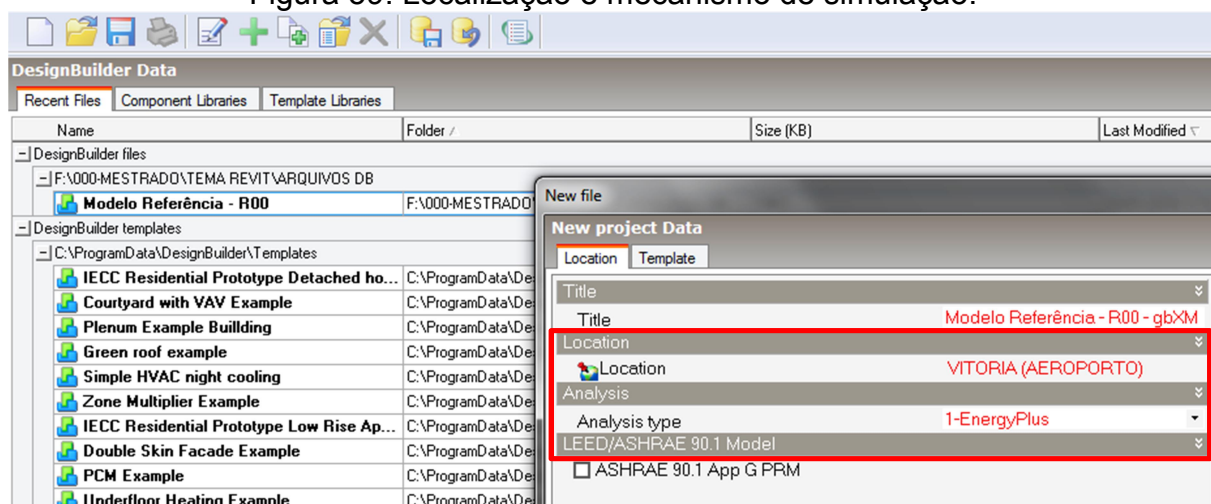
mesmo sendo uma interoperabilidade indireta, já que os arquivos IDF para o EnergyPlus também foram gerados no mesmo procedimento.

5.5.5. DesignBuilder

O DesignBuilder é uma ferramenta BEM desenvolvida pela *DesignBuilder Software Ltd*, uma empresa sediada no Reino Unido que lançou a sua primeira versão em 2005, e é uma das duas ferramentas da lista que não é gratuita, contudo, a empresa possui uma política de licença educacional, o que possibilitou a sua inserção na pesquisa. A versão empregada na pesquisa é o DesignBuilder v5 de 2017 e utiliza como mecanismo de simulação o EnergyPlus 8.5.

A escolha do DesignBuilder teve como referências a sua presença em pesquisas de avaliação energética de edificações e pela interoperabilidade através de arquivos gbXML, desta forma, procedeu-se a importação dos modelos Referência e Ajustado para realização das simulações. Semelhante ao EnergyPlus, a localização das edificações é definida inicialmente como Belo Horizonte/MG, contudo, o DesignBuilder possibilita o ajuste da informação para Vitória/ES, conforme observado na figura 59. Vale também destacar o EnergyPlus como mecanismo de simulação.

Figura 59: Localização e mecanismo de simulação.

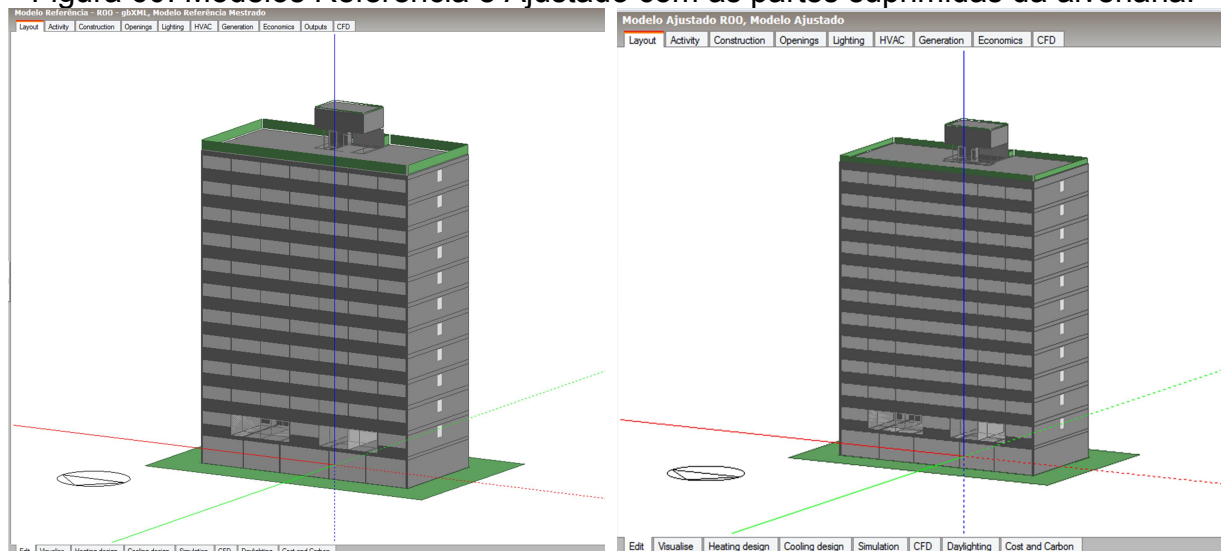


Fonte: DesignBuilder, 2017 – adaptado pelo autor

Após seguir todas as etapas necessárias e estipuladas pela ferramenta para o processo de importação dos arquivos gbXML dos dois modelos pesquisados, é

possível verificar na figura 60 que as edificações foram carregadas sem partes da alvenaria norte do primeiro pavimento e também do acesso à cobertura, contudo, não impediu que o programa realizasse a simulação. Pelo fato de que tanto o modelo Referência quanto o Ajustado tiveram as mesmas partes suprimidas, admite-se realizar as comparações dos resultados das simulações.

Figura 60: Modelos Referência e Ajustado com as partes suprimidas da alvenaria.

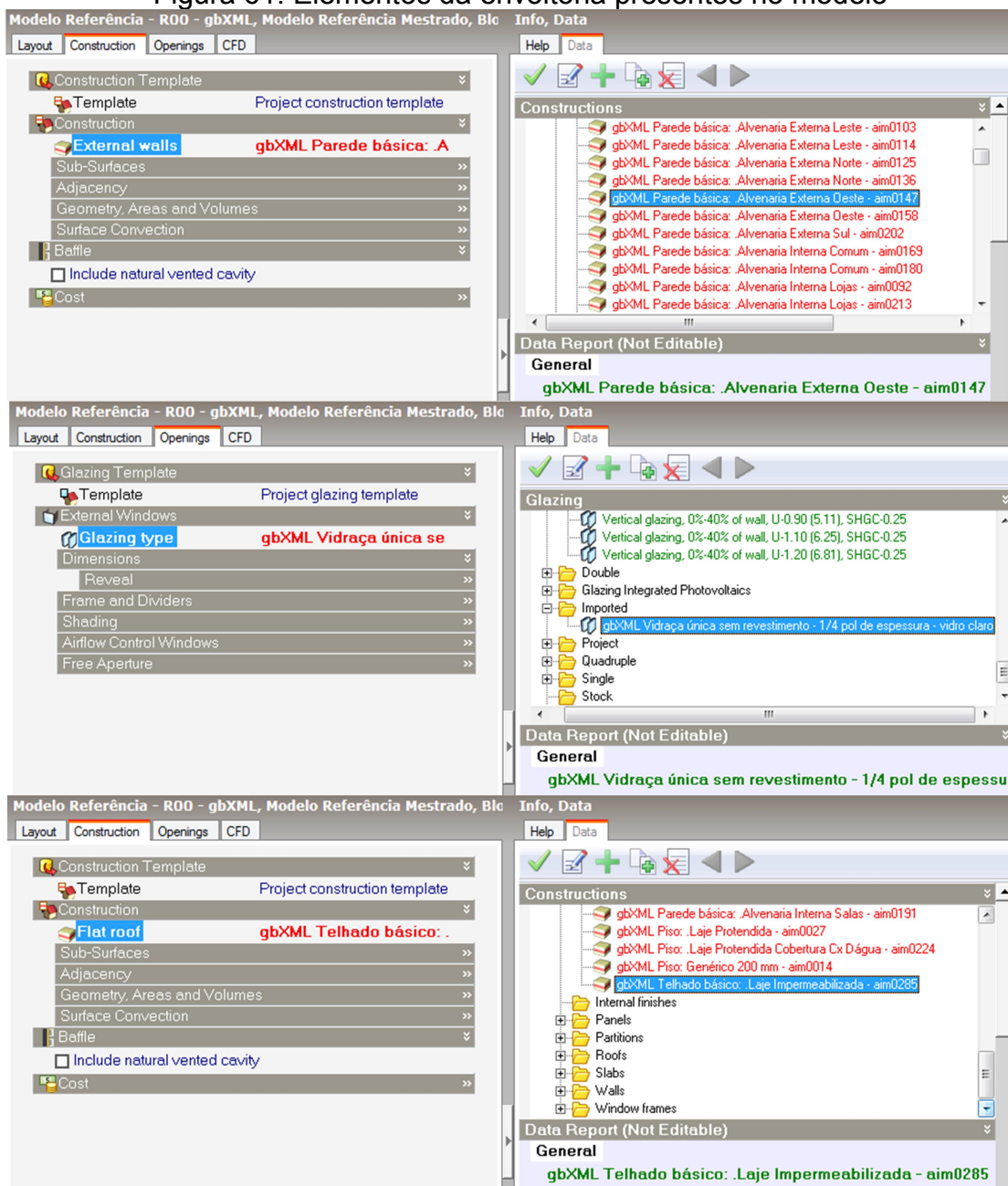


Fonte: DesignBuilder, 2017 – adaptado pelo autor

Com os modelos das edificações carregados as etapas subsequentes, antes de realizar as simulações, visam averiguar se todas as informações importantes compartilhadas nos arquivos gbXML estão presentes após a interoperabilidade, sendo estas: 1) verificar se todos os elementos da envoltória estão presentes – alvenaria, esquadrias (vidros) e cobertura; 2) conferir se todos os componentes de cada elemento foram reconhecidos na importação; e 3) confirmar as propriedades térmicas dos elementos.

Na figura 61 é possível constatar que todos os elementos da envoltória exportados em gbXML foram carregados corretamente durante o processo de compartilhamento.

Figura 61: Elementos da envoltória presentes no modelo



Fonte: DesignBuilder, 2017 – adaptado pelo autor

Confirmado que os elementos das envoltórias estão presentes nos modelos carregados na ferramenta, o próximo passo confere se seus componentes foram importados corretamente. A figura 62 apresenta as camadas e as espessuras dos elementos alvenaria e cobertura.

Figura 62: Camadas dos elementos alvenaria e cobertura

Info, Data	
Help	Data
Layers	
Number of layers	5
Outermost layer	
gbXML .Película_Ar_Externa: 0 [m] - aim0045	
Thickness (m)	0,0008
Bridged?	No
Heat transfer integration mode	3-Integrated Surface
Layer 2	
gbXML .Reboco Paredes: 0,03 [m] - aim0052	
Thickness (m)	0,0250
Bridged?	No
Layer 3	
gbXML Tijolo, Comum: 0,09 [m] - aim0059	
Thickness (not used in thermal calcs) (m)	0,0900
Bridged?	No
Layer 4	
gbXML .Reboco Paredes: 0,03 [m] - aim0052	
Thickness (m)	0,0250
Bridged?	No
Innermost layer	
gbXML .Película_Ar_Interna: 0 [m] - aim0067	
Thickness (m)	0,0013

Fonte: DesignBuilder, 2017 – adaptado pelo autor

A importação dos valores das propriedades térmicas dos elementos das alvenarias e cobertura e também do fator solar dos vidros das esquadrias permite que a ferramenta DesignBuilder execute as simulações para a análise da eficiência energética dos modelos Referência e Ajustado, desta forma, a figura 63 com os valores da transmitância térmica (U) e do fator solar (FS) comprova a correta leitura dos arquivos gbXML das edificações.

Figura 63: Transmitância térmica da alvenaria e da cobertura e fator solar dos vidros

Data Report (Not Editable)	
General	
gbXML Parede básica: .Alvenaria Externa Oeste - aim0147	
Source	
Category	Imported
Region	General
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	
R-Value (m ² -K/W)	
U-Value (W/m ² -K)	1,189

Data Report (Not Editable)	
General	
gbXML Telhado básico: .Laje Impermeabilizada - aim0285	
Source	
Category	Imported
Region	General
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	
R-Value (m ² -K/W)	
U-Value (W/m ² -K)	3,743

Data Report (Not Editable)	
General	
gbXML Vidraça única sem revestimento - 1/4 pol de espessura	
Vidraça única sem revestimento - 1/4 pol	
Source	
Category	Imported
Region	General
Calculated Values	
Total solar transmission (SHGC)	0,620
Light transmission	0,540
U-Value (ISO 15099 / NFRC) (W/m ² -K)	5,905

Fonte: DesignBuilder, 2017 – adaptado pelo autor

Concluídas a verificação e a comprovação de que todas as informações importantes e pertinentes dos modelos Referência e Ajustado foram devidamente compartilhadas no processo de interoperabilidade, coube ao programa DesignBuilder realizar as simulações para a análise e comparação da eficiência energética das edificações.

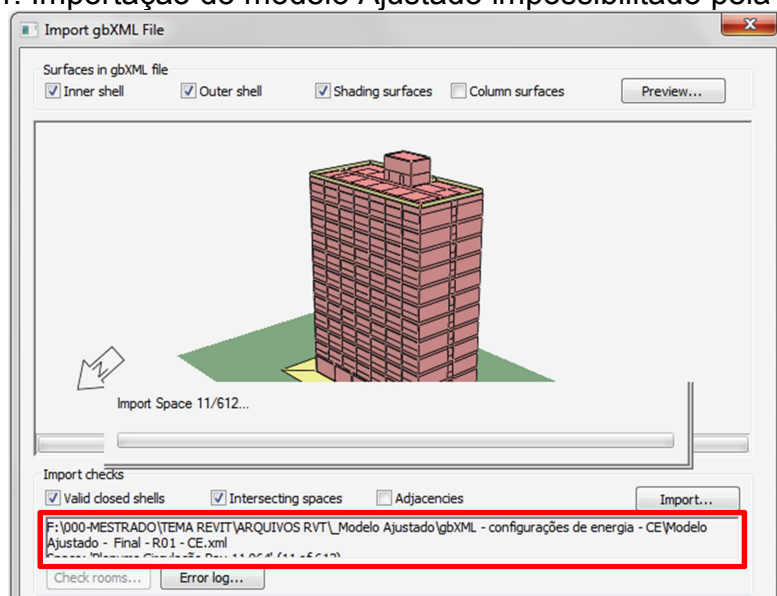
5.5.6. Integrated Environmental Solutions-Virtual Environment – IES-VE

O IES-VE é o segundo programa da lista que não é gratuito e a versão utilizada é a 2017. Desenvolvido pela empresa *Integrated Environmental Solutions Ltd*, sediada no Reino Unido como a *DesignBuilder Software Ltd*, também possui uma política de licença educacional que possibilita adquirir a ferramenta por um valor representativo, além disso, está presente em pesquisas relacionadas à eficiência energética das edificações, tais características possibilitaram ser inserido na pesquisa.

A ferramenta tem como particularidades a utilização de um mecanismo próprio para as simulações energéticas das edificações, o ApacheSim, e também importar arquivos IFC e gbXML no seu processo de interoperabilidade com as ferramentas BIM, sendo a única ferramenta da pesquisa que realmente importou os dois modelos de arquivos, no entanto, com ressalvas.

Inicialmente será abordado o compartilhamento através de gbXML. Imprescindível pontuar que a ferramenta importou somente o arquivo gbXML do modelo Referência, nas tentativas de importar o arquivo referente ao modelo Ajustado a ferramenta trava, o que impossibilita a verificação do compartilhamento das informações e a possibilidade de simulação (figura 64).

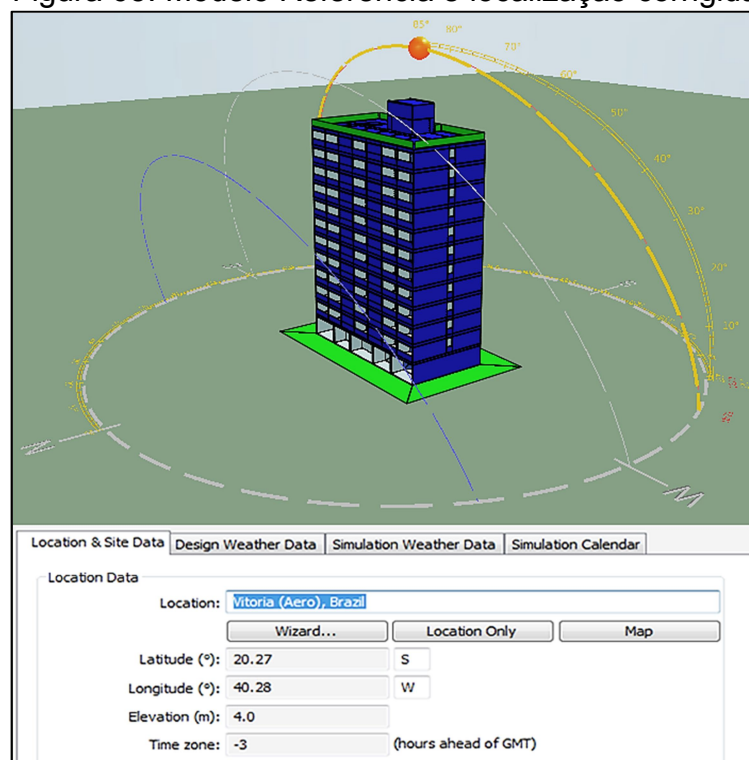
Figura 64: Importação do modelo Ajustado impossibilitado pela ferramenta



Fonte: IES-VE, 2017 – adaptado pelo autor

O arquivo gbXML do modelo Referência foi importado sem intercorrência semelhante ao modelo Ajustado. No entanto, certos componentes da envoltória não foram reconhecidos, mas com o correto posicionamento norte/sul da edificação, e a localização da edificação necessitou ser indicada, sendo utilizada a única opção disponibilizada pela ferramenta que condizia com a cidade de Vitória (figura 65).

Figura 65: Modelo Referência e localização corrigida.



Fonte: IES-VE, 2017 – adaptado pelo autor

Os componentes da envoltória foram identificados, assim como a transmitância térmica de cada conjunto, ocorrendo certa discrepância nos valores da propriedade para a cobertura e alvenaria. O IES-VE reconheceu o valor de 3,729 W/(m²K) para a cobertura e 1,186 W/(m²K) para as alvenarias, sendo os valores corretos 3,743 W/(m²K) e 1,189 W/(m²K), respectivamente. Para os vidros das esquadrias o valor da transmitância térmica é semelhante ao utilizado no modelo, sendo reconhecida a sua fonte. ASHRAE (figura 66).

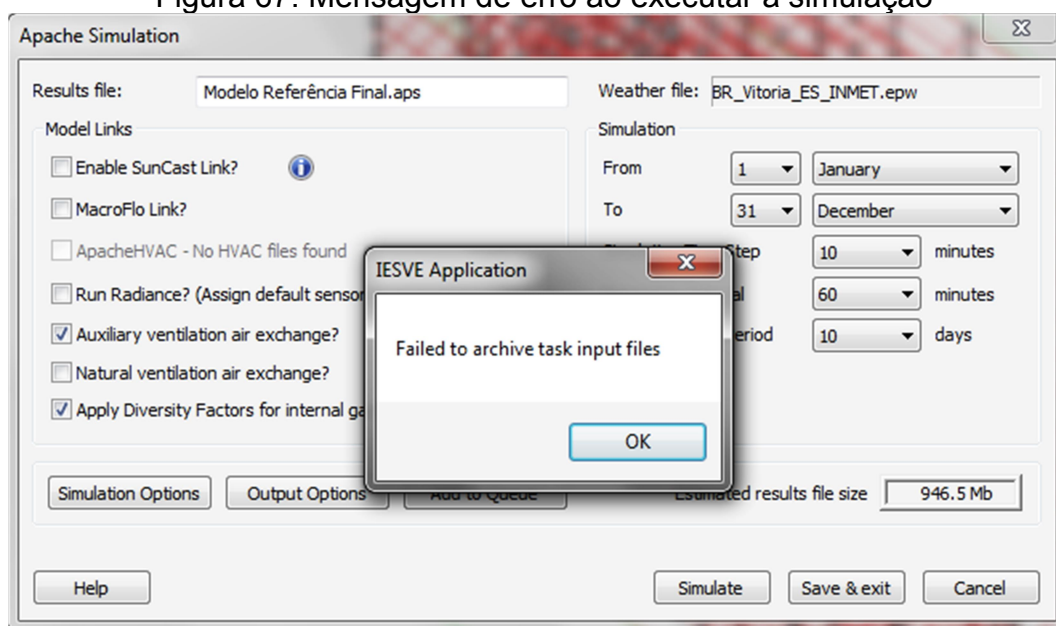
Figura 66: Componentes da envoltória e suas transmitâncias térmicas

Select construction category:			
Ground/exposed floor			
Internal partition			
External wall			
External glazing			
Internal floor/ceiling			
Roof			
Door			
Internal glazing			
ID	Assigned Construction types	Show all	ASHRAE ...
		Standard	U-value
AIM0285	Telhado básico: Laje Impermeabilizada	Generic	3.729
Select construction category:			
Ground/exposed floor			
Internal partition			
External wall			
External glazing			
Internal floor/ceiling			
Roof			
Door			
Internal glazing			
ID	Assigned Construction types	Show all	ASHRAE ...
		Standard	U-value
AIM0202	Parede básica: Alvenaria Externa Sul	Generic	1.186
AIM0103	Parede básica: Alvenaria Externa Leste	Generic	1.186
AIM0125	Parede básica: Alvenaria Externa Norte	Generic	1.186
AIM0147	Parede básica: Alvenaria Externa Oeste	Generic	1.186
Select construction category:			
Ground/exposed floor			
Internal partition			
External wall			
External glazing			
Internal floor/ceiling			
Roof			
Door			
Internal glazing			
ID	Assigned Construction types	Show all	ASHRAE ...
		Standard	U-value
AIM0300	Vidraça única sem revestimento - 1/4 pol (6 mm) de espessura - vidro claro [Fonte: ASHRAE]	Generic	5.905

Fonte: IES-VE, 2017 – adaptado pelo autor

Mesmo ocorrendo a importação do arquivo gbXML, ajustado a localização da edificação e a ferramenta BEM reconhecendo os componentes da envoltória e os valores de suas transmitâncias térmicas, ainda que com certa diferença, o motor de simulação do IES-VE, o ApacheSim, não realizou a simulação do modelo Referência, apresentando a mensagem “Falha ao arquivar os arquivos de entrada de tarefas” (figura 67).

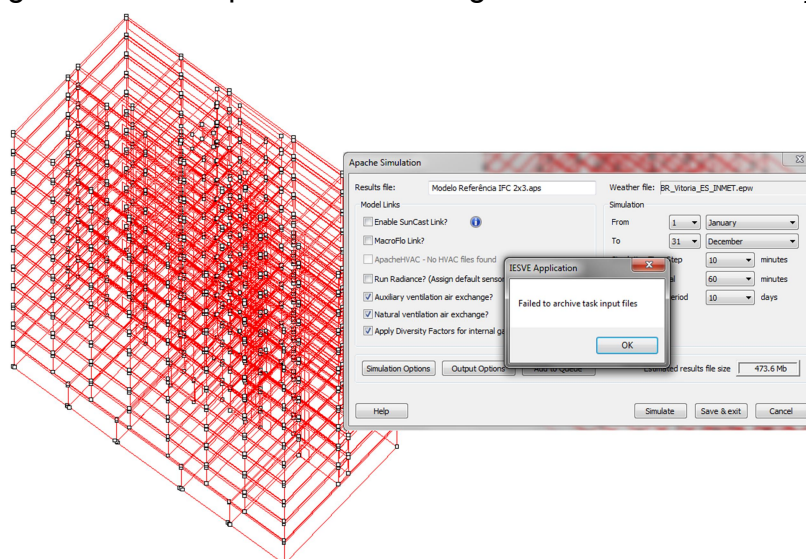
Figura 67: Mensagem de erro ao executar a simulação



Fonte: IES-VE, 2017 – adaptado pelo autor

A interoperabilidade através do arquivo IFC, assim como com os arquivos gbXML, somente ocorreu com o modelo Referência, no entanto, diferentemente de todo o processo e carregamento de informações realizadas com o arquivo gbXML, para o IFC o modelo criado no Revit não foi reconhecido, sendo importado somente um conjunto de linhas sem caracterizar a envoltória, assim como sem qualquer informação de seus componentes, impossibilitando a realização da simulação por parte do ApacheSim, aparecendo a mesma informação do arquivo gbXML (figura 68).

Figura 68: IFC importado e mensagem de falha na simulação



Fonte: IES-VE, 2017 – adaptado pelo autor

Os procedimentos apresentados demonstram a complexa integração entre as ferramentas BIM e BEM. As possíveis formas e níveis de interoperabilidade, assim como as extensões dos arquivos, podem interferir não somente na realização das simulações, mas também nas suas não realizações. Desta forma, as duas ocorrências são consideradas resultados da interoperabilidade.

5.6. ANÁLISES DOS RESULTADOS DA INTEROPERABILIDADE

Os resultados da interoperabilidade entre as ferramentas do BIM e BEM foram classificados em relação à realização da simulação, desta forma, foram divididos em: 1) simulação realizada; 2) simulação não realizada.

Dentre as duas, a última não resulta em desdobramento, comparação ou análise, e por já ter sido apresentada, comentada e explicada no Tópico 5.5, está condensada no quadro 26. Destacando que as simulações não foram realizadas tanto para o modelo Referência quanto para o modelo Ajustado.

Quadro 26: Ferramentas que não realizaram as simulações

Ferramentas BEM	Interoperabilidade	Arquivos	Resultado
eQUEST	Indireta	INP	Conseguiu abrir o arquivo e o modelo foi visualizado, porém, os dados dos componentes da envoltória não foram compartilhados.
OpenStudio	Direta	gbXML e IFC	Os arquivos não foram importados.
	Indireta	IDF	O arquivo não foi importado
IES-VE	Direta	gbXML e IFC	Para o arquivo gbXML a ferramenta importou o modelo e as informações, contudo, não realizou a simulação. Quanto ao arquivo IFC, a ferramenta não importou o modelo completo e nem as suas informações, não realizou a simulação. No caso dos arquivos do modelo Ajustado, a ferramenta se quer importou os arquivos.

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a primeira classificação, a de simulação realizada, os dados resultantes para análise e comparação foram: a área e o consumo energético total anual, sendo este último dividido em iluminação, equipamentos e AVAC. Para a iluminação e equipamentos o consumo foi definido em 20 W/m² e 10 W/m², respectivamente, conforme demonstrados no quadro 22, e inseridos nos modelo do Revit, desta

forma, o consumo do AVAC será a principal variável de comparação, já que somente foi definido o tipo de sistema.

Os dados foram agrupados conforme a matriz de interoperabilidade do quadro 25 e serão comparados de duas formas:

- 1) Comparação intra-modelo – serão comparados os resultados entre os arquivos do mesmo modelo: do modelo Referência e do modelo Ajustado, separadamente;
- 2) Comparação inter-modelos – serão comparados os resultados dos arquivos entre os modelos Referência e Ajustado.

Esta estruturação busca verificar um espectro maior de possíveis variações nos resultados das simulações em função dos esquemas de interoperabilidade utilizadas nesta pesquisa. Desta forma, serão verificados e comparados os resultados das simulações do modelo Referência; do modelo Ajustado e entre os modelos Referência e Ajustado, nesta sequência.

5.6.1. Comparação intra-modelo

No método prescritivo a área total da edificação é definida pela relação da área de projeção da edificação com o número de pavimentos, contudo, para a criação do modelo no Revit é considerada a área dos ambientes. Mesmo apresentando diferença nos valores entre o método prescritivo e a simulação, se o valor utilizado pelo Revit fosse também utilizado no método prescritivo, o modelo Referência permaneceria com o IC_{env} classificado como B e o modelo Ajustado como A (tabela 32).

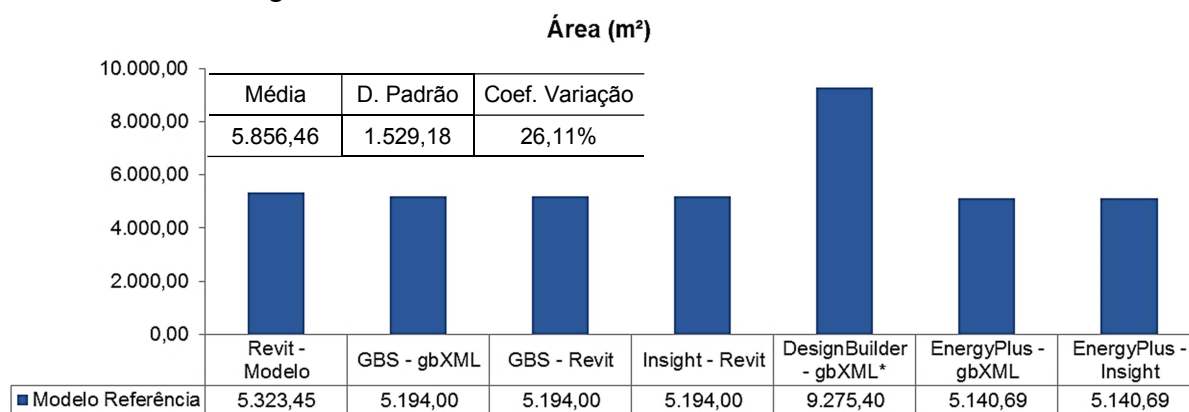
Tabela 32: Tabela comparação da classificação dos modelos em relação às áreas de cada método.

Método	Áreas (m²)	Classificação		Valor Encontrado	
		A	B	Referência	Ajustado
Prescritivo	5.400,00	-	425,33	426,02	423,83
		425,32	429,46		
Simulação	5.323,45	-	425,88	426,57	424,38
		425,87	430,01		

Fonte: Elaborado pelo autor

Desta forma, a figura 69 apresenta o gráfico das áreas do modelo Referência reconhecidas e utilizadas pelas ferramentas BEM para a realização das simulações. É possível verificar que o “DesignBuilder – gbXML” destoou das demais ferramentas, tendo reconhecido uma área 74,23% maior que a área do “Revit – Modelo”, e o arquivo gbXML é o mesmo utilizado pelo “GBS – gbXML”, que reconheceu uma área 2,5% menor, a mesma área para o “GBS-Revit” e “Insight-Revit”. As simulações do EnergyPlus possuem a mesma área e a menor em relação as outras, com redução de 4,5% quando comparada ao “Revit-Modelo”. Verifica-se que o desvio padrão e coeficiente de variação são altos para as áreas reconhecidas após a realização da interoperabilidade, mostrando a significativa dispersão dos valores encontrados quando utilizadas as diferentes ferramentas BEM, tendo o DesignBuilder peso significativo nos valores.

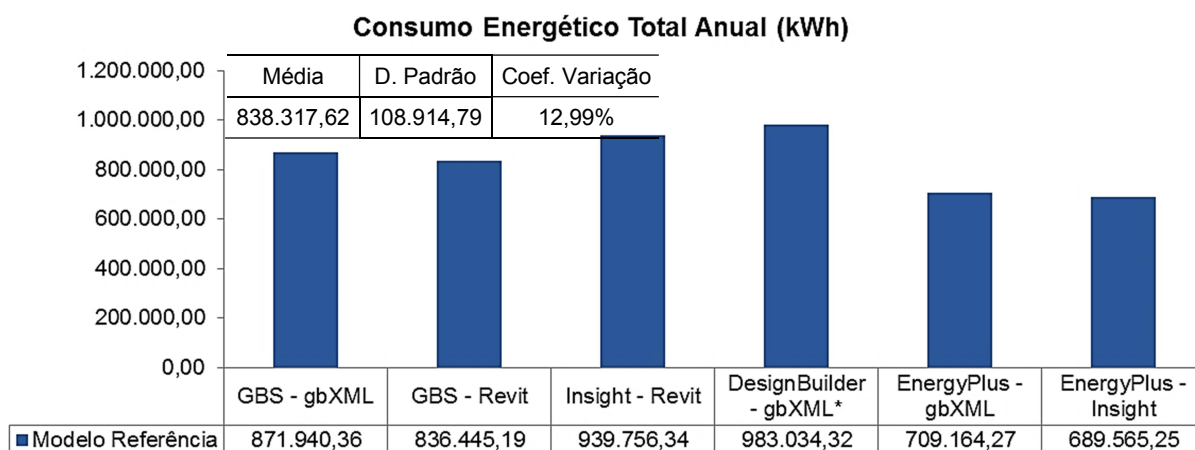
Figura 69: Gráfico das áreas do modelo Referência



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o consumo energético total anual, a figura 70 apresenta o gráfico com os resultados das simulações. Inicialmente estes valores não poderiam apresentar diferenças, no entanto, considerando que as áreas apresentaram variações, e que o consumo está relacionado à área da edificação, presume-se encontrar no máximo três resultados díspares. Porém, é possível constatar variações para todas as simulações. Nem as ferramentas BEM que apresentaram a mesma área para o modelo Referência tiveram resultados iguais, o que denota relevante falha no compartilhamento das informações. Fato relevante é o DesignBuilder não apresentar a mesma discrepância encontrada na área da edificação, e que influenciou diretamente para que o desvio padrão e o coeficiente de variação apresentem uma dispersão menor, porém, ainda expressiva.

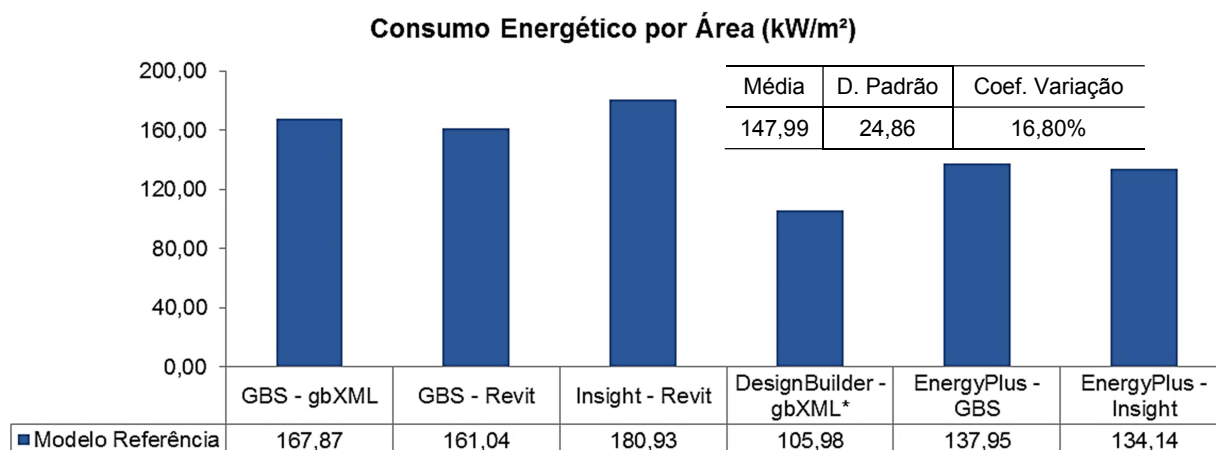
Figura 70: Modelo Referência - consumo energético total anual (kWh).



Fonte: Elaborado pelo autor

O consumo energético anual por área da edificação apresentado pela figura 71 somente confirma a discrepância dos resultados provenientes da falha de envio ou recebimento das informações durante a interoperabilidade, não permitindo sequer conjecturar que a diferença nos valores seja somente pelo não reconhecimento do sistema AVAC, já que os consumos para iluminação e equipamentos foram pré-estabelecidos para o modelo. Essa diferença fica evidenciada quando verificado o desvio padrão e o coeficiente de variação, apresentando uma dispersão mais significativa entre os valores calculados pelas ferramentas.

Figura 71: Modelo Referência - consumo energético total anual por área (kW/m²).



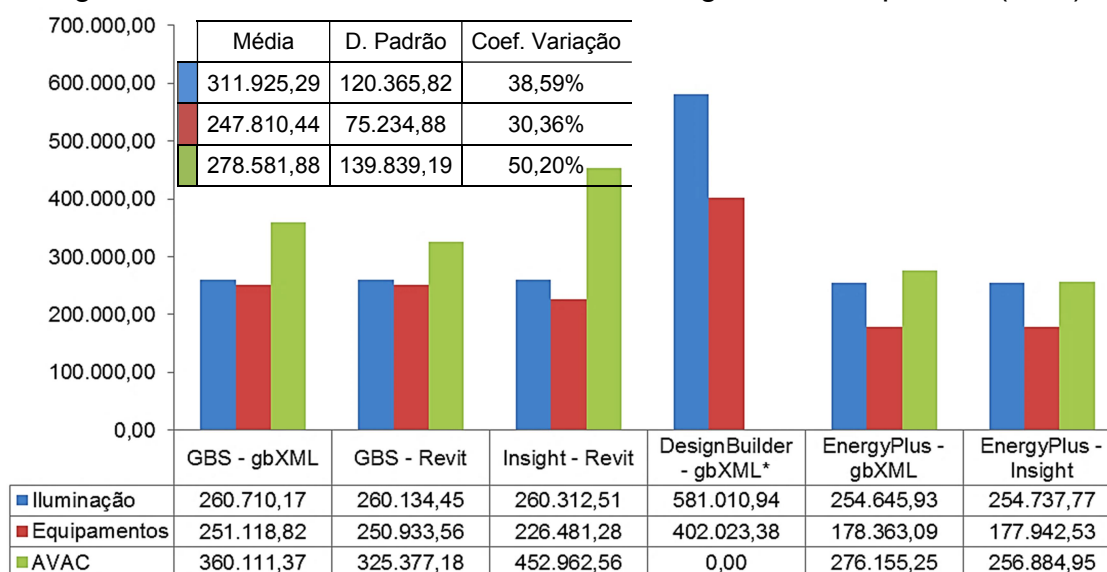
Fonte: Elaborado pelo autor

O consumo energético por área encontrado para edificação comercial vai ao encontro dos dados pesquisados pelo *US Census Bureau* (2011), que em 2000 averiguou que um edifício de escritórios característico nos Estados Unidos consome mais de 300 kW/m² ao ano. Em contra partida, as edificações de alto desempenho

atualmente consomem 100 kW/m² ano. Já na Alemanha o consumo destas mesmas edificações estão na faixa de 50 kW/m² ao ano (KIBERT, 2016).

Os dados de consumo total anual e o consumo total anual por área evidenciam os problemas com os compartilhamentos das informações, no entanto, observá-los de forma separada por disciplinas permite averiguar as possíveis inconsistências que geraram valores diferentes onde deveriam ser idênticos, ao menos nas simulações com as mesmas áreas. A figura 72 apresenta o gráfico que separa o consumo energético total anual entre as disciplinas iluminação, equipamentos e AVAC, sendo que para esta última, na criação do modelo no Revit, foi definido somente o tipo de sistema de climatização. A separação evidenciou o quanto é significativa a dispersão resultante dos cálculos do desvio padrão e do coeficiente de variação para cada disciplina, sendo o sistema AVAC o mais representativo devido ao não reconhecimento pelo DesignBuilder.

Figura 72: Modelo Referência - consumo energético anual por uso (kWh)



Fonte: Elaborado pelo autor

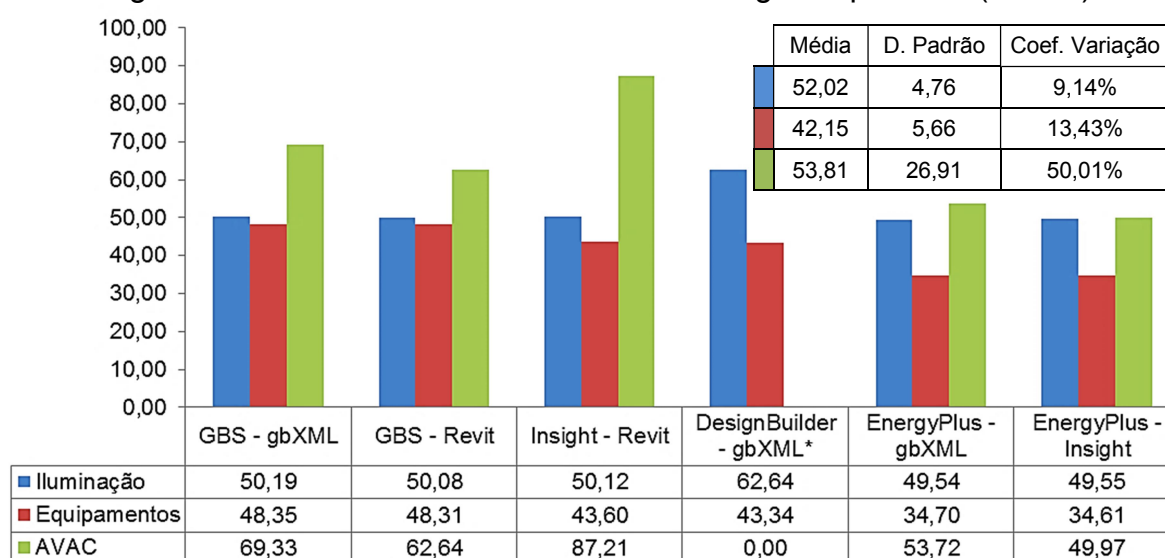
A principal e impactante falha na interoperabilidade é apresentada pelo fato do DesignBuilder não ter reconhecido o sistema AVAC definido para o modelo no Revit e não o considerou no cálculo de consumo energético. Para a disciplina iluminação os resultados do EnergyPlus não possuem variação significativa, da mesma forma para os valores do “GBS-gbXML”, “GBS-Revit” e “Insight-Revit”, sendo o DesignBuilder o protagonista com variação máxima de 128% em relação aos demais resultados.

Para a disciplina equipamentos, o DesignBuilder segue o padrão e apresenta variação máxima de 125% em relação aos valores do EnergyPlus, no entanto, em relação ao “GBS-gbXML”, “GBS-Revit” e “Insight-Revit” a diferença máxima é de 60%, sendo que o “GBS-gbXML” atingiu a máxima de 10% em relação ao “GBS-Revit” e “Insight-Revit”. Já do EnergyPlus em relação às estas ferramentas apresentou variação máxima de 41% e a mínima de 27%.

Os resultados da disciplina AVAC apresentam variações para todas as relações de interoperabilidade. Para as simulações do EnergyPlus a diferença é de 7,5%, já em relação às do “GBS-gbXML”, “GBS-Revit” e “Insight-Revit” oscilou entre 64% e 76%. Entre os três últimos os valores foram 26% e 39%.

A verificação do consumo energético anual por área da edificação faz-se necessária para ratificar se a interoperabilidade permite o compartilhamento das informações contidas nos modelos do Revit, referentes à iluminação e equipamentos, e também comparar os resultados do sistema AVAC. No entanto, quando calculados o desvio padrão e o coeficiente de variação de cada disciplina a dispersão referente à iluminação e aos equipamentos reduziu drasticamente, permanecendo significativa para o sistema AVAC (figura 73).

Figura 73: Modelo Referência - consumo energético por área (kW/m²)



Fonte: Elaborado pelo autor

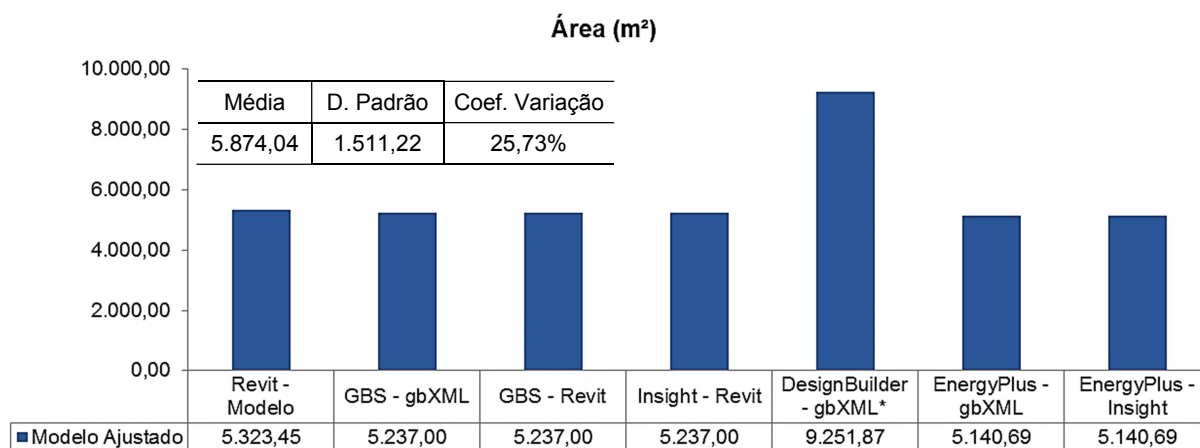
Analisar somente os dados do consumo energético por área acarretaria em uma falsa avaliação em relação ao DesignBuilder, pois, os valores encontrados para os

equipamentos estão próximos aos das outras simulações, sendo a iluminação a disciplina com a maior variação, entre 24% e 26%. Para os equipamentos o resultado da simulação é o terceiro menor, acima somente do EnergyPlus. No entanto, conforme a figura 69, a área reconhecida pela ferramenta é de 9.275,40m², aproximadamente 75% maior que a área do “Modelo-Revit”.

Os valores das outras ferramentas para a iluminação não apresentam variações representativas entre seus pares, já para os equipamentos a diferença máxima encontrada é de 39%, entre o “GBS-gbXML” e o “EnergyPlus-Insight”. Mesmo assim, os valores não são os 20 W/m² e 10 W/m² definidos no Revit para estas disciplinas. Em relação ao AVAC a discrepância demonstra as distorções da interoperabilidade no entendimento do sistema e equipamentos definido no Revit por parte das ferramentas BEM.

Dando continuidade nas comparações e análises, a figura 74 expõe o gráfico com as áreas da edificação que foram reconhecidas após a interoperabilidade do modelo Ajustado. Observa-se a homogeneidade nos valores das áreas entre os “GBS-gbXML”, “GBS-Revit” e “Insight-Revit”, uma diferença de 1,7% em relação ao “Revit-Modelo”, essa homogeneidade também é visível nos valores do EnergyPlus, com uma redução de 3,5%. Seguindo o padrão verificado no modelo Referência, o DesignBuilder apresenta valor discrepante, com diferença superior a 70%. Mesmo apresentando redução em relação ao modelo Referência, o desvio padrão e o coeficiente de variação continuam altos, mantendo uma significativa dispersão dos valores reconhecidos pelas ferramentas BEM.

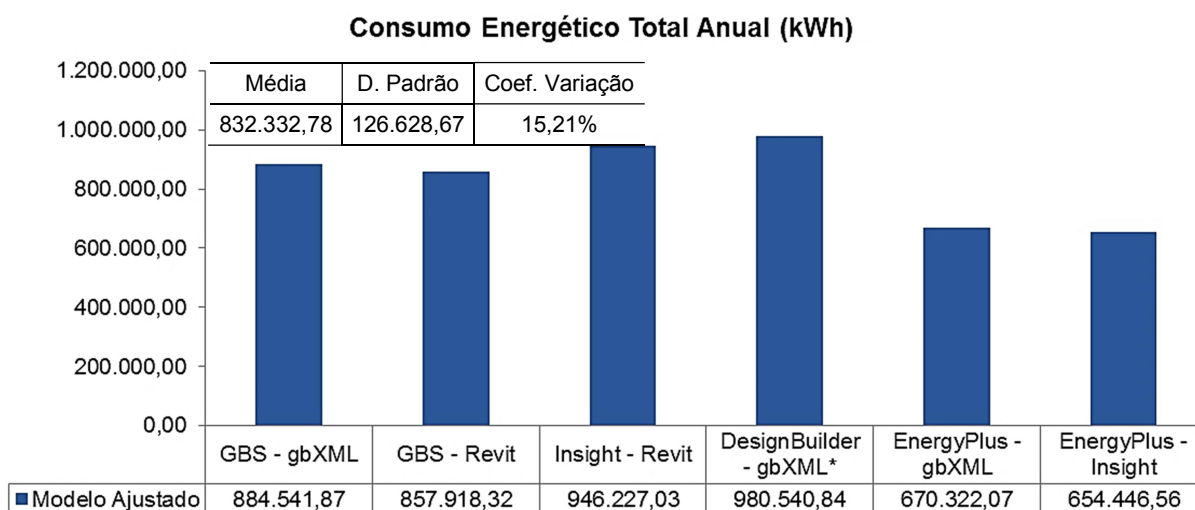
Figura 74: Modelo Ajustado - Gráfico das áreas do modelo Ajustado



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 75 apresenta o gráfico do consumo energético total anual do modelo Ajustado. Semelhante ao modelo Referência é possível visualizar variações superiores às encontradas para as áreas e também a heterogeneidade dos resultados, nem as ferramentas BEM que apresentaram a mesma área para o modelo Ajustado tiveram consumos iguais. Novamente o destaque é o DesignBuilder que não repetiu a mesma inconsistência, caso contrário o resultado seria igualmente maior. Como somente o EnergyPlus apresentou redução no consumo, os demais apresentaram ampliação, o desvio padrão e o coeficiente de variação são ainda mais alto que os do modelo Referência, tornando o grau de dispersão mais representativa.

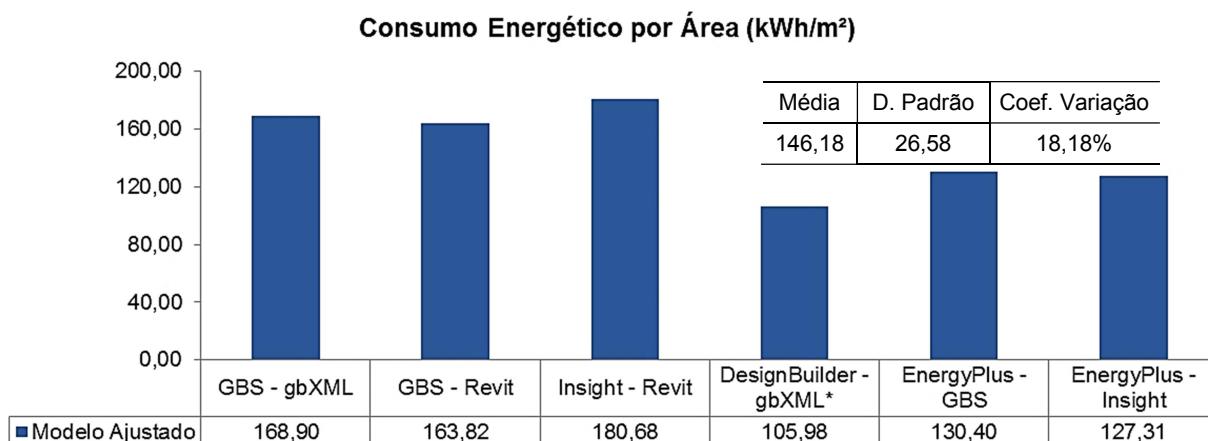
Figura 75: Modelo Ajustado - consumo energético total anual (kWh).



Fonte: Elaborado pelo autor

Como não poderia ser diferente, o consumo energético por área do modelo Ajustado observado na figura 76 apresenta valores distintos tanto para simulações que apresentaram áreas diferentes quanto para as que possuem a mesma área, no entanto, o destaque é o DesignBuilder apresentar valores idênticos de consumo energético por área para os modelos Referência e Ajustado, porém, como as áreas reconhecidas são diferentes, resulta em valores distintos para o consumo energético total anual. Por ser resultante da relação da área da edificação e do consumo anual, o desvio padrão e o coeficiente de variação tiveram alta significativa, acarretando numa dispersão expressiva.

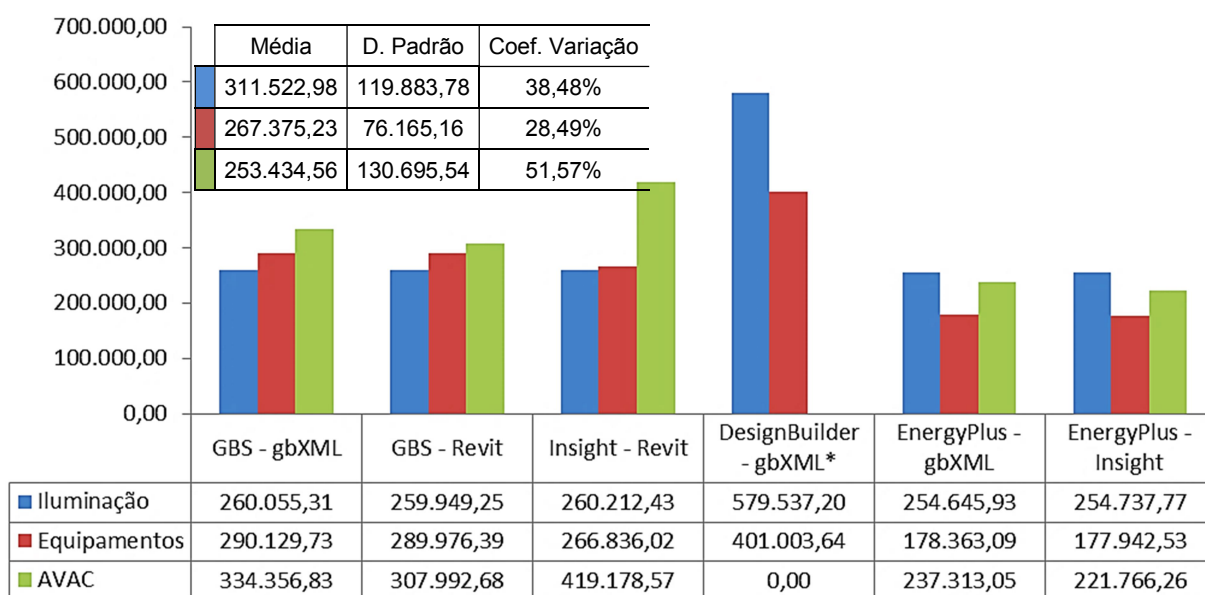
Figura 76: Modelo Ajustado - consumo energético total anual por área (kW/m²).



Fonte: Elaborado pelo autor

Como as simulações apresentaram resultados diferentes no consumo energético anual, até mesmo as ferramentas BEM em que as áreas são iguais, a figura 77 apresenta o gráfico que separa o consumo energético total anual entre as disciplinas iluminação, equipamentos e AVAC, visando compreender as discrepâncias. De imediato, a falha de interoperabilidade encontrada para o modelo Referência também é verificada no modelo Ajustado, o DesignBuilder não reconheceu o sistema AVAC definido no Revit. Para a disciplina iluminação, a diferença entre os resultados do EnergyPlus é desprezível e o mesmo pode ser constatado entre o “GBS-gbXML”, “GBS-Revit” e “Insight-Revit”, no entanto, o DesignBuilder apresentou variação máxima de 127% em relação às outras ferramentas.

Figura 77: Modelo Ajustado - consumo energético anual por uso (kWh)



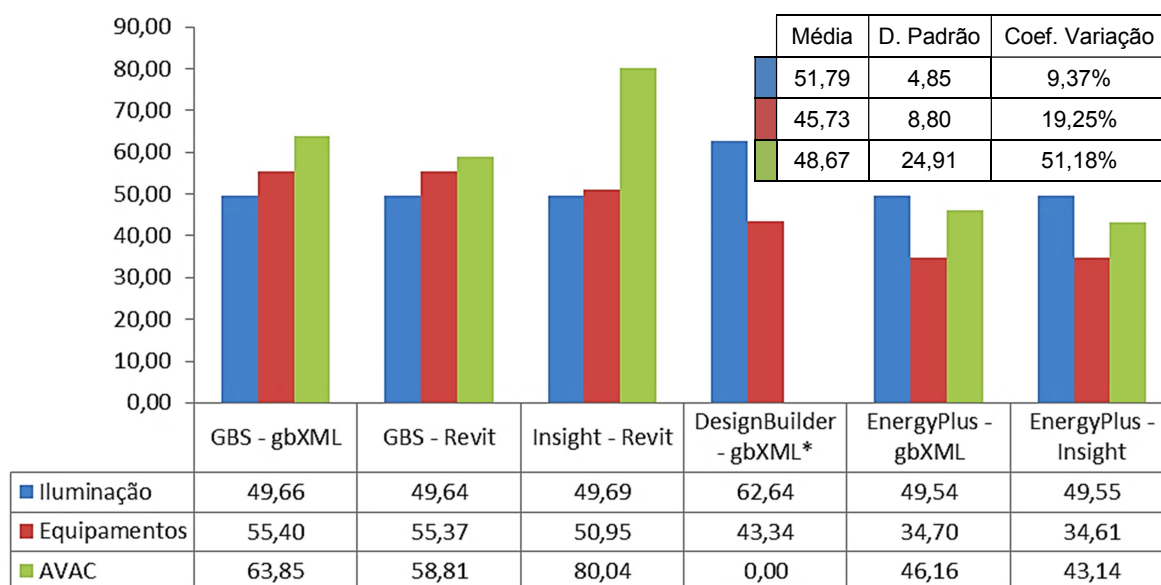
Fonte: Elaborado pelo autor

Para a disciplina equipamentos, os valores das simulações do EnergyPlus permanecem com variação desprezível, semelhante aos resultados do “GBS-gbXML” e “GBS-Revit”, contudo, ambos possui diferença máxima de 9% em relação ao “Insight-Revit”. O DesignBuilder segue padronizado e apresenta variação máxima de 125% em relação aos valores do EnergyPlus e de 50% em relação ao “GBS-gbXML”, “GBS-Revit” e “Insight-Revit”. O EnergyPlus em relação às ferramentas da Autodesk possui variação entre 50% e 63%.

A disciplina AVAC possui variações em todas as relações de interoperabilidade. As simulações do EnergyPlus apresentaram diferença de 7% entre si, já em relação às do “GBS-gbXML”, “GBS-Revit” e “Insight-Revit” variou de 76% a 89%. Entre as três simulações realizadas pelas ferramentas da Autodesk os resultados variaram entre 25% e 36%.

Para as três disciplinas o desvio padrão e o coeficiente de variação são altos, apresentando dispersão significativa, no entanto, somente o sistema AVAC teve alta no coeficiente de variação em relação ao modelo Referência.

Quando observado o consumo energético anual em relação à área da edificação, figura 78, os resultados do DesignBuilder apresentam coerência quando comparados com os demais, contudo, os valores são diretamente afetados pela área da edificação reconhecida pela ferramenta, que é 70% maior que a definida no Revit. O destaque principal é a variação desprezível do consumo da iluminação entre as 5 simulações, desconsiderando o DesignBuilder, que caso fosse considerado teria uma diferença para os demais de aproximadamente 26%.

Figura 78: Modelo Ajustado - consumo energético por área (kW/m²)

Fonte: Elaborado pelo autor

O EnergyPlus apresenta variação desprezível também para os equipamentos e em relação aos valores obtidos pelas ferramentas da Autodesk, oscilou entre 47% e 60%, já entre as três a diferença máxima é de 9%. Para o DesignBuilder a área da edificação reconhecida influenciou diretamente no resultado menor do que os calculados para o “GBS-gbXML”, “GBS-Revit” e “Insight-Revit”.

O que chama atenção é o fato que nas duas simulações do EnergyPlus o consumo do AVAC é menor que o da iluminação e a maior variação é observada no “Insight-Revit,” o que demonstra os defeitos da interoperabilidade para o entendimento do sistema definido no Revit.

Para o consumo energético por área o desvio padrão e a coeficiente de variação da iluminação apresenta dispersão aceitável, no entanto, para os equipamentos e sistema AVAC os valores são altos e a dispersão significativa, a alta também é observada em relação ao modelo Referência.

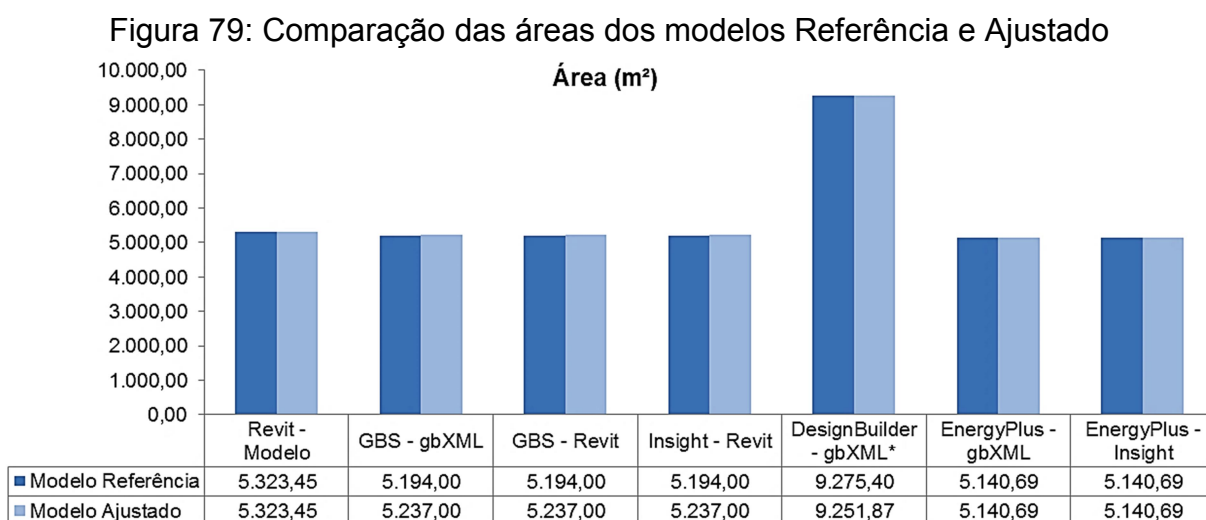
Como podem ser constatados, os resultados das simulações dos arquivos de um mesmo modelo foram divergentes ou até nulas, isso quando executadas. Ocorreram resultados com mínimas diferenças, outras com substancial variação e até situação de nulidade por não reconhecimento da informação necessária para simulação. Dentre os resultados analisados, dois devem ser destacados: 1) as diferenças dos valores resultantes das simulações realizadas pelo DesignBuilder e pelo GBS para o

mesmo arquivo gbXML e 2) a variação mínima dos resultados apresentados pelo EnergyPlus para dois arquivos distintos e originados por uma interoperabilidade indireta, de segundo nível. Resta verificar os impactos dessas divergências nas comparações entre as simulações dos modelos Referência e Ajustado.

5.6.2. Comparação inter-modelos

Esta etapa é o ponto focal da pesquisa, pois, busca verificar se os dados obtidos dos cálculos do método prescritivo para os componentes das envoltórias dos dois modelos, o Referência e o Ajustado, e que os classificaram como C/D e A, respectivamente, resultaram em simulações que representem essa diferença de classificação depois de realizadas as interoperabilidades. Para isso, serão comparados e analisados entre si os resultados das simulações dos dois modelos.

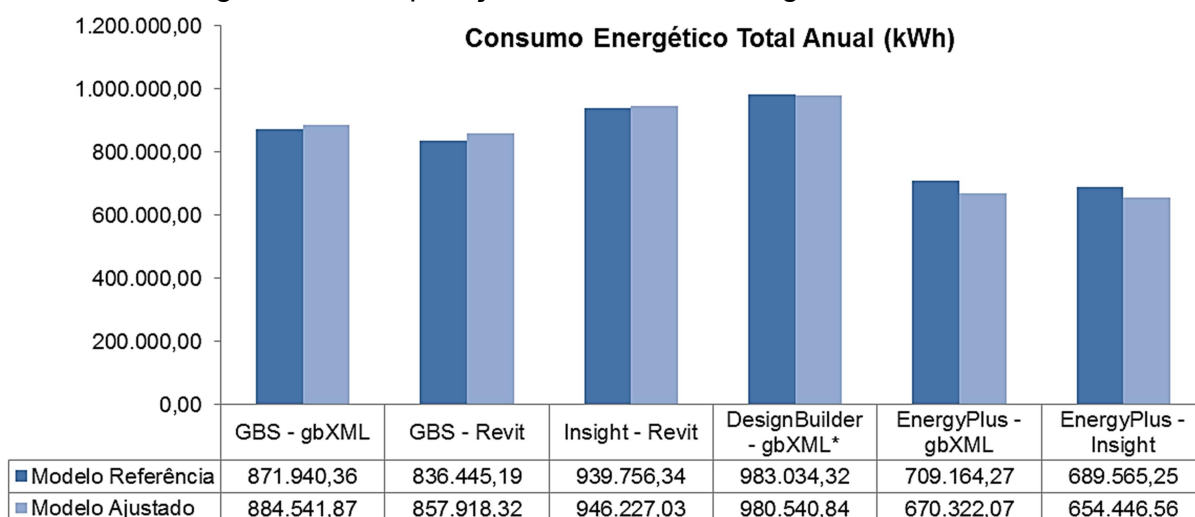
Inicialmente, a figura 79 apresenta o gráfico comparando as áreas que foram reconhecidas e utilizadas nas realizações das simulações por cada ferramenta BEM. É possível verificar dois cenários principais: 1) a diferença nas áreas entre os modelos, sendo que no DesignBuilder a área do modelo Ajustado é menor que a do modelo Referência enquanto no “GBS-gbXML”, “GBS-Revit” e “Insight-Revit” foi o inverso, modelo Ajustado maior que o modelo Referência; 2) o EnergyPlus reconheceu a mesma área para os dois modelos. No entanto, todas são diferentes em relação às do “Revit-Modelo”.



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 80 apresenta o gráfico com o comparativo do consumo energético total anual entre os modelos e o padrão de divergência observado para as áreas também é encontrado neste contexto. Os resultados das simulações realizadas no “GBS-gbXML”, “GBS-Revit” e “Insight-Revit” apontam para o maior consumo energético do modelo Ajustado enquanto que o DesignBuilder apresenta redução inexpressiva. As simulações do EnergyPlus foram as que apresentaram variação negativa expressiva para o modelo Ajustado. Tais variações podem ser o reflexo das divergências nas áreas apresentadas pela figura 75, no entanto, somente com o gráfico do consumo energético total não é possível constatar tal suposição, sendo necessário separa o gráfico entre as disciplinas.

Figura 80: Comparação do consumo energético total anual

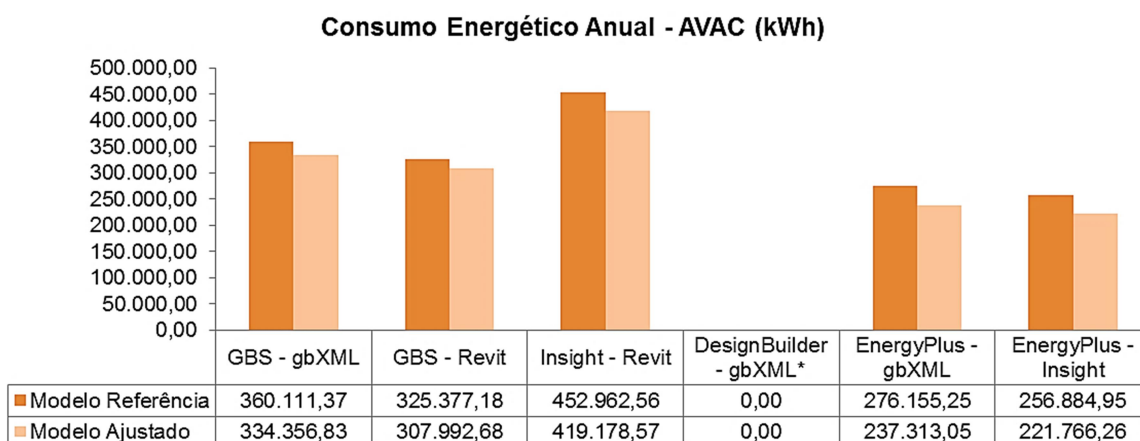
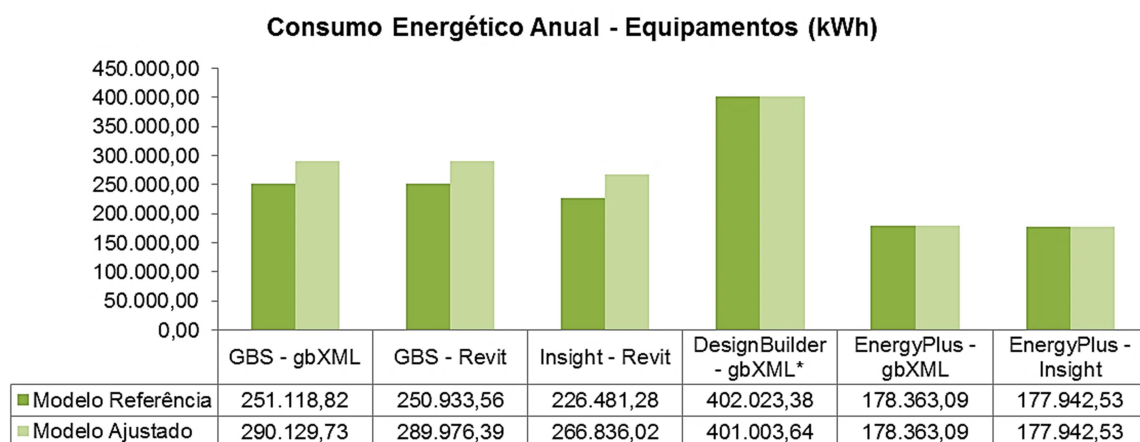
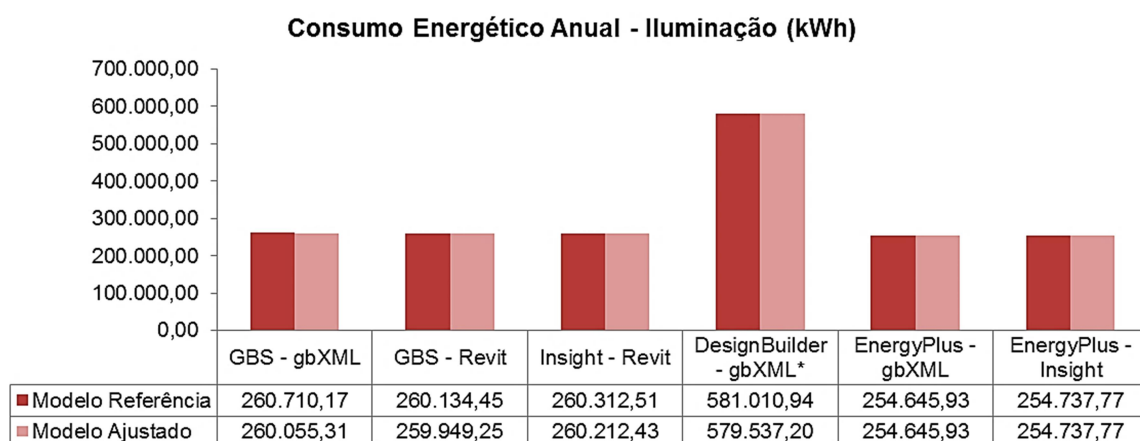


Fonte: Elaborado pelo autor

Os gráficos da iluminação, equipamentos e AVAC (figura 81) permitem compreender qual disciplina teve maior peso no resultado do consumo energético total para cada simulação realizada pelas ferramentas BEM. Em relação à iluminação é possível observar uma redução menor que 1% nos valores do modelo Ajustado para as simulações do “GBS-gbXML”, “GBS-Revit”, “Insight-Revit” e do DesignBuilder, sendo as simulações do EnergyPlus as únicas idênticas entre os dois modelos. Quando verificados os resultados para os equipamentos as simulações do “GBS-gbXML”, “GBS-Revit”, “Insight-Revit” se destacam por apresentarem aumentos nos valores do modelo Ajustado, sendo 15,5% para os dois primeiros e 17,8% para o último. O DesignBuilder manteve a redução abaixo de 1% e o EnergyPlus com valores idênticos para as duas simulações.

Para a disciplina AVAC a redução dos valores do modelo Ajustado em relação ao modelo Referência representa a influência direta das alterações realizadas na envoltória após os cálculos do método prescritivo, que elevou o nível da classificação para A. Esta variação negativa pode ser observada em cinco das seis simulações, já que o DesignBuilder não reconheceu o sistema definido para os modelos.

Figura 81: Comparação do consumo energético anual separado por disciplinas



Fonte: Elaborado pelo autor

No entanto, as reduções nos valores do AVAC nas simulações do “GBS-gbXML”, “GBS-Revit” e “Insight-Revit” em 7,2%, 5,4% e 7,5%, respectivamente, ficaram abaixo da variação positiva dos equipamentos, o que influenciou diretamente no aumento do consumo energético total anual do modelo Ajustado em relação ao modelo Referência. Porém, os acréscimos nas áreas do modelo Ajustado apresentados por estas mesmas simulações podem ser responsáveis por esta variação positiva, caso os consumos energéticos por área para iluminação e equipamentos dos dois modelos sejam idênticos.

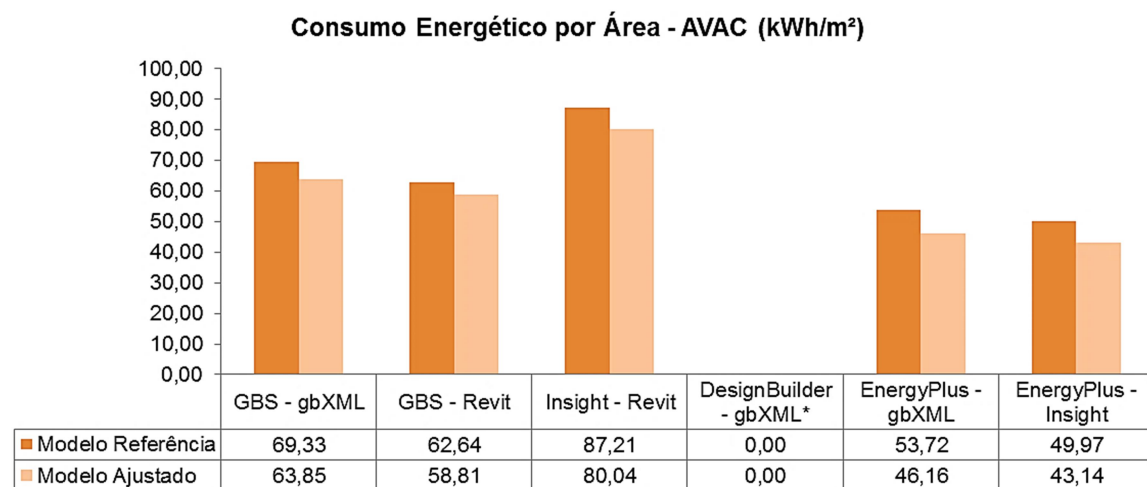
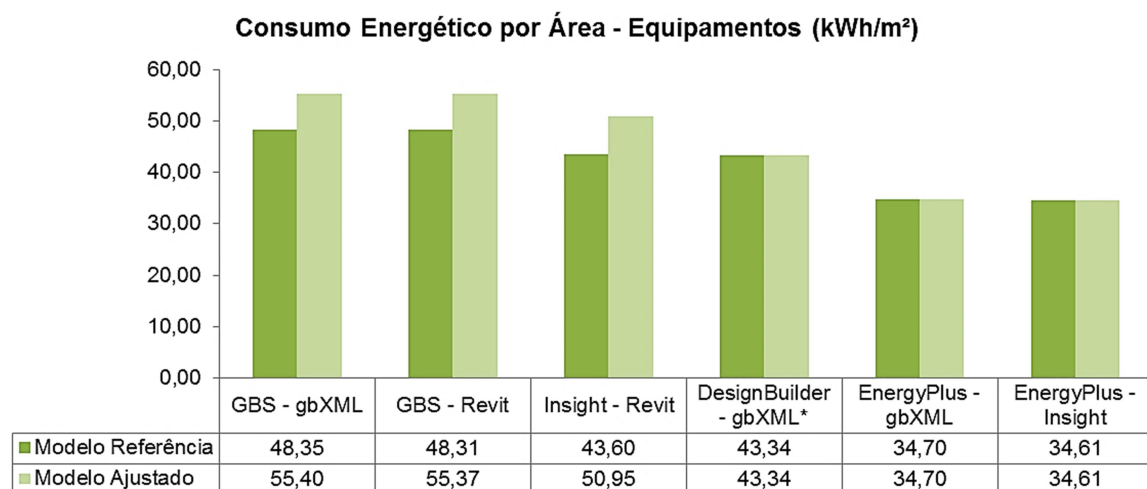
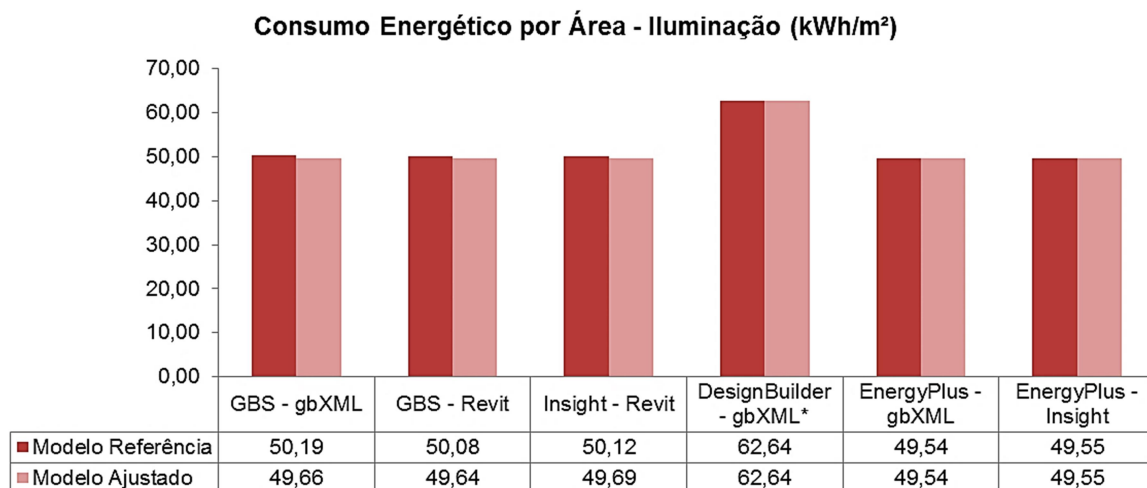
Desta forma, para verificar a ocorrência de variação entre os dois modelos nos consumos energéticos por área para as disciplinas iluminação e equipamentos, a figura 82 apresenta os gráficos com os resultados das simulações. Para a iluminação, a variação de consumo entre os modelos somente é observada para as simulações do “GBS-gbXML”, “GBS-Revit” e “Insight-Revit”, e esta variação é negativa e não ultrapassa 1%, praticamente desprezível. Quanto às simulações do DesignBuilder e EnergyPlus, os valores encontrados para os modelos são idênticos, resultados coerentes, pois, o consumo definido para esta disciplina, e informado nos modelos do Revit, é o mesmo para as duas edificações.

Os resultados do consumo energético dos equipamentos também apresentaram valores idênticos para os modelos nas simulações do DesignBuilder e EnergyPlus, no entanto, no “GBS-gbXML”, “GBS-Revit” e “Insight-Revit” as variações são positivas para o modelo Ajustado em relação ao Referência e superaram substancialmente as encontradas na iluminação, que foram negativas, sendo 14,6% para os dois primeiros e de 16,9% para o último.

Para o sistema AVAC todas as simulações apresentaram como resultado variação negativa para o modelo Ajustado, exceto o DesignBuilder que obteve resultado nulo por não ter reconhecido o sistema AVAC definido para os modelos e inseridos no Revit. A redução no consumo energético para o AVAC é o resultado almejado pelo modelo Ajustado, pois, concretiza a mudança do nível de classificação C/D do modelo Referência para o nível de classificação A do modelo Ajustado, realizado pelo método prescritivo. No entanto, as variações negativas encontradas nas simulações do “GBS-gbXML”, “GBS-Revit” e “Insight-Revit” de 7,9%, 6,1% e 8,2%

respectivamente, são superadas pelas variações positivas dos equipamentos, que quando relacionadas à área maior do modelo Ajustado resultam no aumento do consumo energético total anual verificado no gráfico da figura 80.

Figura 82: Comparação do consumo energético por área separado por disciplinas



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados analisados comprovam a perda ou o não reconhecimento de informações no processo de interoperabilidade entre as ferramentas do BIM e BEM. A comparação dos dados das simulações dos modelos Referência e Ajustado chamam atenção para o fato de que as simulações provenientes das formas de interoperabilidade direta – com as ferramentas GBS e Insight; e por exportações – através dos formatos gbXML e IFC, apresentaram resultados inconsistentes e discrepantes, tornando o modelo Referência mais eficiente que o modelo Ajustado, impossibilitando o mínimo de confiabilidade.

Os destaques positivos foram os resultados das simulações do EnergyPlus, que sempre apresentaram o modelo Ajustado mais eficiente que o modelo Referência, principalmente por serem resultantes de uma interoperabilidade indireta, de segundo nível, de uma interoperabilidade direta – Insight, e de uma exportação – gbXML. Os resultados foram consistentes em todos os itens: a) na área da edificação b) no consumo energético total anual; c) no consumo energético da iluminação e d) no consumo energético dos equipamentos, para os dois modelos, ocorrendo pequena variação no consumo energético do sistema AVAC, que não interfere no resultado final.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

O BIM tem sido considerado como a revolução no processo de projetar e construir edificações desde o advento do computador e do sistema CAD na indústria AEC. A metodologia BIM tem como essência principal a informação, todo e qualquer dado indispensável na criação e execução de uma edificação está acessível no modelo virtual. Além disso, as informações precisam acompanhar automaticamente cada alteração e atualização do projeto, estar parametrizada ao modelo, e possibilitar o compartilhamento destas informações, sem perda de dados, com outras ferramentas através da interoperabilidade.

A interoperabilidade permite que os modelos virtuais criados nas ferramentas do BIM possam compartilhar os dados físicos, ambientais e comerciais dos seus componentes, peças e sistemas construtivos, dependendo da relação existente com outras ferramentas. Para isso existem as dimensões do sistema BIM, comumente denominadas de 3D, 4D, 5D, 6D e 7D, que relacionam a forma como o modelo é criado e programado com os tipos de informações que serão retiradas dele.

Esta pesquisa teve como premissa verificar a interferência das formas de interoperabilidade e as extensões IFC e gbXML nos resultados das simulações energéticas de dois modelos de uma edificação comercial padrão desenvolvidas na ferramenta do BIM e compartilhadas com as ferramentas de modelagem energética – BEM. Para a modelagem BIM foi escolhida a ferramenta Autodesk Revit e como ferramentas BEM foram o GBS; EnergyPlus; OpenStudio; eQUEST; Insight; DesignBuilder e IES-VE.

Como parâmetro de referência para a comparação da eficiência energética entre as edificações, foi utilizado o Método Prescritivo do PROCEL Edifica para calcular a eficiência de cada modelo, classificando-as e caracterizando as propriedades térmicas dos componentes de suas envoltórias. Desta forma, foi criado o modelo Referência, com classificação de IC_{env} B e para a envoltória C/D, e o modelo Ajustado, com classificação A para o IC_{env} e para a envoltória.

A escolha da ferramenta Revit se mostrou adequada para a pesquisa, pois, propiciou a modelagem e detalhamento das edificações com todos os componentes

de suas envoltórias – alvenarias, cobertura e esquadrias – de forma que as suas propriedades térmicas como a resistência térmica (R); a transmitância térmica (U) e a condutividade térmica (λ); fossem idênticas às utilizadas e obtidas nos cálculos do Método Prescritivo. Outra característica do Revit que contribui de forma satisfatória à pesquisa, foi que além de exportar os modelos nos formatos IFC e gbXML também permitiu a interoperabilidade direta com o GBS e o Insight, ampliando o campo de atuação da investigação.

As três formas de interoperabilidade utilizadas na pesquisa – direta; exportação e indireta (segundo nível) – determinou uma série de resultados distintos, inclusive, situações que se quer foram concebidas, como simulações díspares de um mesmo modelo de estudo.

Das onze simulações definidas e possíveis para cada modelo, cinco não foram realizadas e que correspondem a três ferramentas do BEM. O eQUEST abriu o arquivo nativo INP oriundo de uma interoperabilidade indireta, contudo, somente reconheceu o modelo virtual; o IES-VE importou os arquivos IFC e gbXML, no entanto, semelhante ao eQUEST, somente reconheceu o modelo, sendo o do gbXML mais completo que do IFC. Já o OpenStudio sequer importou e/ou abriu os arquivos que se propunha fazê-lo: IFC, gbXML e o IDF, que é oriundo de uma interoperabilidade indireta. O eQUEST e o IES-VE por terem reconhecido os modelos, possibilitariam concluir a modelagem energética das edificações com a inserção dos dados das envoltórias perdidos no processo de interoperabilidade.

As seis simulações que resultaram nas análises, duas foram por interoperabilidade direta – GBS e Insight; duas por exportação – GBS e DesignBuilder e duas por interoperabilidade indireta – EnergyPlus. A ferramenta DesignBuilder foi a que apresentou a maior perda de informação na importação do arquivo gbXML, não identificando o sistema AVAC estipulado no Revit e praticamente dobou a área das edificações, tais inconsistência influenciaram diretamente nos resultados das simulações. As duas simulações realizadas pelo GBS e a simulação do Insight apresentaram valores idênticos para as áreas das edificações e padrões de variações semelhantes para os consumos energéticos, no entanto, os resultados não permitem afirmar que o modelo Ajustado é mais eficiente que o modelo

Referência, principalmente porque apresentam o modelo Referência como mais eficiente no consumo energético dos equipamentos, e deveriam ser iguais.

O EnergyPlus, mesmo abrindo um arquivo IDF proveniente de uma interoperabilidade indireta, é a única ferramenta BEM que permite afirmar que o modelo Ajustado é mais eficiente que o modelo Referência.

Conclui-se que a interoperabilidade entre as ferramentas do BIM e BEM para a simulação de eficiência energética da edificação se apresenta ainda incipiente e interfere diretamente nos resultados, não sendo prudente utilizá-los sem qualquer ajuste nos modelos diretamente nas ferramentas do BEM, a exceção é o EnergyPlus, que mesmo resultando de uma interoperabilidade indireta confirmou que o modelo Ajustado é mais eficiente que o modelo Referência, confirmando os resultados encontrados após os cálculos do método Prescritivo. Quanto aos formatos de exportação, o IFC mostrou-se totalmente inapto para o compartilhamento de informações para simulação e análise de eficiência energética de edificações, quando importado pelo IES-VE somente compartilhou as arestas da envoltória de cada pavimento que compõe a edificação.

No intuito de dar continuidade e aprofundamento ao tema, recomenda-se para pesquisas futuras para:

- Pesquisar qual o nível máximo de detalhamento da edificação a ser modelada na ferramenta do BIM para realizar as simulações pelas ferramentas BEM;
- Mensurar as horas de retrabalho necessárias para inserir e ajustar nas ferramentas BEM as informações perdidas dos modelos no processo de interoperabilidade;
- Verificar qual a melhor produtividade e resultado: criar um modelo com nível básico de detalhamento na ferramenta do BIM e simular nas ferramentas BEM ou criar um modelo volumétrico na BIM e complementar as informações na BEM;
- Pesquisar em qual etapa e nível da interoperabilidade as informações foram corrompidas e/ou perdidas.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

ABANDA, F. H.; BYERS, L., An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling). **Energy**, v. 97, p. 517-527, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-1**: Desempenho térmico de edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005c.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro, 2013b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-5**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas. Rio de Janeiro, 2013c.

AHNA, K.-U.; KIMA, Y.-J.; PARKA, C.-S.; KIMB, I.; LEE, K., BIM interface for full vs. semi-automated building energy simulation. **Energy and Buildings**, v. 68, p. 671–678, 2014.

AKSAMIJA, A., BIM – based building performance analysis: Evaluation and simulation of design decisions. **Proceedings of the 2012 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings**, Pacific Grove, CA, USA, p. 12-17, 2012.

ANDERSON, K.; KIM, H.; LEE, S.; HILDRETH, J., Generating construction schedules through automatic data extraction using open BIM (building information modeling) technology, **Automation in Construction**. V. 35, p. 285 - 295, 2013.

ANDRADE, M. L. V. X.; RUSCHEL, R. C. BIM: conceitos, cenário das pesquisas publicadas no Brasil e tendências. In: WORKSHOP BRASILEIRO GESTÃO DO PROCESSO DE PROJETO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS, 9., 2009, São Carlos. **Anais...** São Paulo: USP, 2009. 1 CD-ROM.

ARAYICI, Y.; FERNANDO, T.; MUNOZ, V.; BASSANINO, M., Interoperability specification development for integrated BIM use in performance based design. **Automation in Construction**, v. 85, p. 167–181, 2017.

AsBEA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS ESCRITÓRIOS DE ARQUITETURA. **Guia AsBEA Boas Práticas em BIM: Estruturação do Escritório de Projeto para a Implantação do BIM – Fascículo 1**. São Paulo, 2013.

AsBEA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS ESCRITÓRIOS DE ARQUITETURA. **Guia AsBEA Boas Práticas em BIM: Fluxo de Projetos em BIM: Planejamento e Execução – Fascículo 2**. São Paulo, 2015.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 90.1-2013: energy standard for buildings except low-rise residential buildings**. Atlanta, 2013.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 140-2011 – Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs**. Atlanta, 2011.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Handbook – Fundamentals, SI Edition**. Atlanta, 2013.

ASL, M. R.; ZARRINMEHR, S.; YAN, W., Towards BIM-based parametric building energy performance optimization. In **ACADIA – Adaptive Architecture**, p. 101-108, 2013.

ASL, M. R.; ZARRINMEHRA, S.; BERGINB, M.; YAN, W., BPOpt: A framework for BIM-based performance optimization. **Energy and Buildings**, v. 108, p. 401–412, 2015.

ASL, R. M.; BERGIN, M.; MENTER, A.; YAN, W., BIM-based Parametric Building Energy Performance Multi-Objective Optimization. *Proceedings of the 32^a Conference of Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe)*, p. 1-10, 2014.

ATTIA, S., State of the art of existing early design simulation tools for net zero energy, Buildings: A Comparison of Ten Tools (Technical Report). Louvain La Neuve, Belgium, 2011.

ATTIA, S.; BELTRÁN, L.; HERDE, A. D.; HENSEN, J., “Architect friendly”: a comparison of ten different building performance simulation tools, Presented at the Building Simulation, p. 204–211, 2009, Scotland.

AUGENBROE, G.; DE WILDE, P.; MOON, H. J.; MALKAWI, A.; BRAHME, R.; CHOUDHARY, R., The design analysis integration (DAI) initiative, **Proceedings of the 8th IBPSA Conference**, Netherlands – 79-86, 2003.

AUGENBROE, G.; DE WILDE, P.; VAN DER VOORDEN, M.; BROUWER, J.; KAAAN, H., Assessment of the need for computational support in energy-eHcient

design projects in the Netherlands. In: **Proceedings of the Building Simulation**, Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brasil, 13 - 15, 2001.

AUTODESK, Green Building Studio. [S.l.] Autodesk Inc., 2017. Disponível em: <<https://gbs.autodesk.com/GBS/>>. Acessado em: 28/06/2017.

AUTODESK, Insight. [S.l.] Autodesk Inc., 2017. Disponível em: <<https://insight.autodesk.com/oneenergy>>. Acessado em: 10/07/2017.

AUTODESK, Knowledge Network – Autodesk Revit 2017. [S.l.] Autodesk Inc., 2017. Disponível em: <<http://help.autodesk.com/view/RVT/2017/PTB/>>. Acessado em: 13/09/2017.

AUTODESK, Revit Architectural 2017. [S.l.] Autodesk Inc., 2017. Disponível em: <<https://www.autodesk.com.br/products/revit-family/overview>>. Acessado em: 12/01/2017.

AYRES FILHO, C. **Acesso ao modelo integrado do edifício**. 2009. 254 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR.

AZEVEDO, O. J. M.; **Metodologia BIM - Building Information Modeling na Direção Técnica de Obras**. 2009. 114 f. Dissertação (Mestrado). Universidade do Minho. Braga – PT.

AZHAR, S.; Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. **Leadership and Management in Engineering**, v. 11, p. 241-252, jul. 2011. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/>> Acesso em: 20 dez. 2015.

BAHAR, Y. N.; PERE, C.; LANDRIEU, J.; NICOLLE, C., A thermal simulation tool for building and its interoperability through the Building Information Modeling (BIM) platform, *Buildings* 3 (2) (2013) 380–398.

BASSO, T. M.; NOGUEIRA, C. E. C.; SILVA, D. S.; Eficiência energética na construção civil no Brasil. **Revista Acta Iguazu**, Cascavel, v. 4, n. 1, p. 48-56, 2015. Disponível em: <<http://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/issue/view/719>>. Acesso em: 11 set. 2015.

BAZJANAC, V., IFC BIM-Based methodology for semi-automated building energy performance simulation. **Proceedings of CIB-W78 25th International Conference on Information Technology in Construction**, Santiago, Chile, 2008.

BAZJANAC, V.; KIVINIEMI, A., Reduction, simplification, translation and interpretation in the exchange of model data, Presented at CIB-W78, Maribor, Slovenia 2007. 163–168.

BEAZLEY, S.; HEFFERNAN, E.; MCCARTHY, T. J., Enhancing energy efficiency in residential buildings through the use of BIM: The case for embedding parameters during design. **Energy Procedia**, v. 121, p. 57–64, 2017.

BERNABÉ, A. C. A.; **A influência da envoltória no consumo energético em edifícios comerciais artificialmente climatizados na cidade de Vitória - ES**, 2012, 133 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES.

BOTTAMEDI, M. G.; **Avaliação da eficiência energética de hotéis de quatro estrelas em Florianópolis**: aplicação do programa de etiquetagem de edificações, 2011, 179 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC.

BRASIL. Decreto n. 4.059, de 19 de dezembro de 2001. Regulamenta a Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2001a. Disponível em: <www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2001/D4059.htm>. Acesso em: 16 nov 2015.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Portaria 163, de 08 de junho de 2009**. Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001462.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2015.

BRASIL. Instrução Normativa nº 2 de 4 de junho de 2014. Dispõe sobre regras para a aquisição ou locação de máquinas e aparelhos consumidores de energia pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional, e uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) nos projetos e respectivas edificações públicas federais novas ou que recebam retrofit. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2014. Disponível em: <<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=102&data=05/06/2014>>. Acesso em: 15 nov 2016.

BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2001b. Disponível em: <www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10295.htm> Acesso em: 16 nov 2015.

BRYDE, D.; BROQUETAS, M.; VOLM, J. M.; The project benefits of Building Information Modelling (BIM). **International Journal of Project Management**, v. 31, p. 971-980, out. 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 15 nov. 2015.

buildingSMART – INTERNATIONAL HOME OF OPENBIM. **BIM Guides**, 2015. Disponível em: <<http://bimguides.vtreem.com/bin/view/BIMGuides/Guidelines>>. Acesso em: 12 dez 2015.

CAMPBELL, D. A.; Modeling Rules. 2006. **Architecture Week**. Disponível em: <http://www.architectureweek.com/2006/1011/tools_1-1.html>. Acesso em: 15 set 2015.

CARLO, J. C. **Desenvolvimento de metodologia de avaliação da eficiência energética do envoltório de edificações não-residenciais**. 2008. 215 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis - SC.

CARLO, J. C.; LAMBERTS, R.; Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios – parte 1: método prescritivo. **Ambiente Construído**, v. 10, p. 27-40, abr./jun. 2010a. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/publicacoes/artigos-de-periodicos>>. Acessado em: 02 dez. 2015.

CARLO, J. C.; LAMBERTS, R.; Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios – parte 2: método de simulação. **Ambiente Construído**, v. 10, p. 27-40, abr./jun. 2010b. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/publicacoes/artigos-de-periodicos>>. Acessado em: 02 dez. 2015.

CARLO, J.C.; PEREIRA, F. O. R.; LAMBERTS, R. Iluminação natural para redução do consumo de energia de edificações de escritório aplicando propostas de eficiência energética para o código de obras do Recife. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10, jul. 2004, São Paulo. **Anais...**

CASAGRANDE, B. G.; **Cenários climáticos futuros: diagnóstico prospectivo do desempenho termoenergético de edifícios comerciais no Brasil para o século XXI**, 2013, 136 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES.

CEMESOVA, A.; HOPFE, C., J.; MCLEOD, R., S.; PassivBIM: Enhancing interoperability between BIM and low energy design software. *Automation in Construction* v. 57, p. 17–32, maio de 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 10 nov. 2016.

CHECCUCCI, E. S. **Ensino-aprendizagem de BIM nos cursos de graduação em Engenharia Civil e o papel da Expressão Gráfica neste contexto**. 2014. 235 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal da Bahia, Salvador/BA

CHECCUCCI, E. S.; AMORIM, A. L.; A modelagem de informações para construção como inovação tecnológica. In: ENCONTRO DE TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 5., 2011, Salvador, Brasil. **Anais...** Salvador: UFBA, 2011. 1 CD-ROM.

CHECCUCCI, E. S.; PEREIRA, A. P. C.; AMORIM, A. L.; Uma visão da difusão e apropriação do paradigma BIM no Brasil – TIC 2011. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 19-39, jan.-jun. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4237/gtp.v8i1.232>>. Acesso em: 10 out. 2015.

CHEN P. H.; CUIA, L.; WANA, C.; YANGB, Q.; TINGA, S. K.; TIONGA, R. L. K.; Implementation of IFC-based web server for collaborative building design between architects and structural engineers. **Automation in Construction**, v. 14, p. 115–128, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 10 nov. 2016.

CHEN, D.; DOUMEINGTS, D., European Initiatives to develop interoperability of enterprise applications - basic concepts, framework and roadmap, **Journal of Annual reviews in Control** v. 27: 151 - 160. 2003.

CHO, C-S.; CHEN, D., WOO, S., Building Information Modeling (BIM)-Based Design Of Energy Efficient Buildings. **Proceedings** of the 28th ISARC, 1079-1084, 2011, Seoul, Korea.

CHO, Y. K., HAM, Y., GOLPAVAR-FARD, M., 3D as-is building energy modeling and diagnostics: A review of the state-of-the-art. **Advanced Engineering Informatics**, v. 29, p. 184-195, abr. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 15 nov. 2015.

CHO, Y. K.; ALASKAR, S.; BODE, T. A., BIM-integrated sustainable material and renewable energysimulation. In J. Buwanpura, Y. Mehamed, & S. Lee (Eds), **Proceedings** of the 2010 Construction Research Congress, May 8-10, 2010, Banff, Alberta, Canada. ASCE, 978-0-7844-1109-4, Vol. 2. pp. 288-297.

CHOI, J. S.; KIM, J. E.; KIM, I. H., Development of open BIM-based construction for energy performance assessment in the design phase, **Proceeding BIM Academic Conference on buildingSMART Association**, Gangwon, Korea, 2010.

CHOI, J.; SHIN, J.; KIM, M.; KIM, I., Development of openBIM-based energy analysis software to improve the interoperability of energy performance assessment. **Automation in Construction**, v. 72, p. 52–64, 2016.

CHONG, H.-Y.; LEE, C.-Y.; WANG, X., A mixed review of the adoption of Building Information Modelling (BIM) for sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 4114-4126, 2017.

CLAYTON, M. J.; HABERL, J.; YAN, W.; KOTA, S.; FARIAS, F.; JEONG, W.; KIM, J.; ALCOCER, J. B., Development of a Reference Building Information Model (BIM) for Thermal Model Compliance Testing, RP-1468, ASHRAE, 2013.

COVELO, M. A.; Especial BIM. **Revista AU**, São Paulo, Ed. 208, Julho 2011.

CRAWLEY, D. B.; HAND, J. W.; KUMMERT, M.; GRIFFITH, B. T.. **Contrasting the capability of building energy performance simulation programs**, United States Department of Energy and University of Strathclyde and University of Wisconsin. 2005.

CRESPO, C. C., RUSCHEL, R. C.; Ferramentas BIM: um desafio para a melhoria no ciclo de vida do projeto. In: III ENCONTRO DE TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL, jul. 2007, Porto Alegre/RS. **Anais...**

CROSBIE, T.; DAWOOD, N.; DEAN, J., Energy profiling in the life-cycle assessment of buildings. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, v. 21(1), p. 20-31, 2010

DESIGNBUILDER, DesignBuilder v5. [S.l.] DesignBuilder Software Ltd., 2017. Disponível em: <<https://www.designbuilder.co.uk>>. Acessado em: 22/02/2017.

DI GIUDA, G. M.; VILLA, V.; PIANTANIDA, P., BIM and energy efficient retrofitting in school buildings. **Energy Procedia**, v. 78, p. 1045–1050, 2015.

DÍAZ-VILARIÑO, L.; LAGÜELA, S.; ARMESTO, J.; ARIAS, P., Indoor daylight simulation performed on automatically generated-as-built 3D models. **Energy and Buildings**, v. 68, p. 54–62, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 12 nov. 2016.

DIDONÉ, E. L., **A influência da luz natural na avaliação da eficiência energética de edifícios contemporâneos de escritórios em Florianópolis/SC**. 2009. 179 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – SC.

DOE – UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Energy Efficiency and Renewable Energy. **EnergyPlus Energy Simulation Software**. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>. Acesso em: 23 out 2015.

DOE, EnergyPlus 8.5. [S.I.] U.S. Department of Energy, 2016. Disponível em: <<https://energyplus.net>>. Acessado em: 13/04/2017.

DONG, B.; LAM, K. P.; HUANG, Y. C.; DOBBS, G. M., A comparative study of the IFC and gbXML informational infrastructures for data exchange in computational design support environments, **Proceedings, Building Simulation**, p. 1530 – 1537, 2007.

DONG, B.; O'NEILL, Z.; LI, Z., A BIM-enabled information infrastructure for building energy Fault Detection and Diagnostics. **Automation in Construction**, v. 44 p. 197–211, 2014.

DUBOIS, M. C.; HORVAT, M. State-of-the-Art of Digital Tools Used by Architects for Solar Design (**Report** No. T. 41. B. 1): International Energy Agency. 2010.

EADIE, R.; BROWNE, M.; ODEYINKA, H.; MCKEOWN, C.; MCNIFF, S.; BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle: An analysis. **Automation in Construction**, v. 36, p. 145-151, dez. 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

EASTMAN, C., TEICHOLZ, P., SACKS, R., LISTON, K., **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors**, 2nd Edition. John Wiley & Sons, New Jersey, 2011.

EASTMAN, C., TEICHOLZ, P., SACKS, R., LISTON, K., **Manual de BIM: Um Guia de Modelagem da Informação da Construção para Arquitetos, Engenheiros, Gerentes, Construtores e Incorporadores**. Bookman, Porto Alegre, 2014.

EL-DIRABYA, T.; KRIJNENB, T.; PAPAGELISC, M., BIM-based collaborative design and socio-technical analytics of green buildings. **Automation in Construction**, v. 82, p. 59–74, 2017.

eQUEST, the Quick Energy Simulation Tool v3.65. [S.l.] James J. Hirsch & Associates, 2016. Disponível em: <<http://www.doe2.com/equest>>. Acessado em: 25/03/2017.

FERRARI P. C.; SILVA N. F.; LIMA E. M., Building Information Modeling and Interoperability with Environmental Simulation Systems. In: Sobh T. (eds) Innovations and Advances in Computer Sciences and Engineering. Springer, Dordrecht 2010.

FERREIRA, S. L. Definição de propriedades e características de componentes BIM comuns a partir do energyplus. Gestão e Tecnologia de Projetos, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 61-70, jul./dez. 2015.

FLORIO, W.; Tecnologia da informação na construção civil: Contribuições do Building Information Modeling no processo de projeto em arquitetura. In: III FÓRUM DE PESQUISA FAU MACKENZIE. 2007 São Paulo/SP. **Anais eletrônicos...** São Paulo: Universidade Prebisteriana Mackenzie, 2007. Disponível em: <http://www.mackenzie.br/fileadmin/Graduacao/FAU/Publicacoes/PDF_IIIForum_b/MACK_III_FORUM_WILSON_FLORIO.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2015.

FOSSATI, M.; LAMBERTS, R.; Eficiência energética da envoltória de edifícios de escritórios de Florianópolis: discussões sobre a aplicação do método prescritivo do RTQ-C. **Ambiente Construído**, v. 10, p. 59-69, abr./jun. 2010. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/publicacoes/artigos-de-periodicos>>. Acessado em: 02 dez. 2015.

FREIRE, M. R.; TAHARA, A.; AMORIM, A. L., Investigação sobre ferramentas computacionais de avaliação do desempenho térmico apropriadas ao contexto BIM para aplicação em projetos De HIS. Paper presented at the XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC 2012), Juiz de Fora.

GALLAHER, M. P.; O'CONNOR, A. C.; DETTBARN J. L.; GILDAY, L. T.; Cost Analysis of Inadequate Interoperability in the U.S. Capital Facilities Industry, ago. 2004. **National Institute of Standards and Technology**. Gaithersburg, MD. 2004.

GARBINI, M. A. L.; **Proposta de modelo para implantação e processo de projeto utilizando a tecnologia BIM**. 2012. 182 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá/MT.

GARCIA, E. G.; ZHU, Z.; Interoperability from building design to building energy modeling. **Journal of Building Engineering**, v. 1, p. 33-41, mar. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 15 nov. 2015.

GERRISHA, T.; RUIKARA, K.; COOKA, M.; JOHNSON, M.; PHILLIP, M.; LOWRY, C., BIM application to building energy performance visualisation and management: Challenges and potential. **Energy and Buildings**, v. 144, p. 218–228, 2017.

GOEDERT, J. D., MEADATI, P., Integrating construction process documentation into building information modeling. **Journal of Construction Engineering and Management** ASCE, v. 134, p. 509-516, jul. 2008. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/>> Acesso em: 18 nov. 2015.

GOMES, V.; A sustentabilidade é uma ideia de longo prazo [out. 2007]. Evelise Grunow. **Projeto Design**. São Paulo: Ed. Arco, n.332, out. 2007. Disponível em: <<http://arcoweb.com.br/projetodesign/entrevista/vanessa-gomes-01-10-2007>>. Acesso em: 15 set 2015.

GRILO, A., GONÇALVES, R., J., Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working environments. **Automation in Construction** v. 19, p. 522–530, 2010.

HABERL, J. S., SIMBUILD survey: academic use of simulation software, Presented at SIMBUILD 2008, Berkeley, California 2008.

HAM, Y.; GOLPARVAR-FARD, M.; Mapping actual thermal properties to building elements in gbXML-based BIM for reliable building energy performance modeling. **Automation in Construction**, v. 49, p. 214–224, jan. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 15 nov. 2015.

HENNINGER, R. H.; WITTE, M. J., **EnergyPlus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Loads Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2011**. For U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy Office of Building Technologies, from GARD Analytics, Inc, Arlington Heights, Illinois, 2012.

HOWARD, R.; BJÖRK, B. C.; Building information modelling – Experts' views on standardisation and industry deployment. **Advanced Engineering Informatics**, v. 22, p. 271-280, abr. 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 10 nov. 2015

IES, IESVE 2017. [S.l.] Integrated Environmental Solutions Limited, 2017. Disponível em: <<https://www.iesve.com>>. Acessado em: 15/02/2017.

ISIKDAG, U.; AOUAD, G.; UNDERWOOD, J.; WU, S., Building information models: a review on storage and exchange mechanisms, **Proceedings of the CIB W78's 24th International Conference on IT in Construction** – 135 - 143. 2007.

JUDKOFF, R.; NEYMARK, J., **Twenty Years On!: Updating the IEA BESTEST Building Thermal Fabric Test Cases for ASHRAE Standard 140 – Preprint**. To be presented at the 2013 Building Simulation Conference Chambéry, France, 2013.

KAM, C.; FISCHER, M., Capitalizing on early project decision-making opportunities to improve facility design, construction, and life-cycle performance — POP, PM4D, and decision dashboard approaches, **Automation in Construction**, v. 13: 53 – 65, 2004.

KIBERT, C. J., **Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery**, 4th Edition. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2016

KIM, I.; KIM, J.; SEO, J.; Development of an IFC - Based IDF Converter for Supporting Energy Performance Assessment in the Early Design Phase. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering - JAABE**, v. 11, p. 313 - 320, 2012.

KIM, J. B.; JEONG, W.; CLAYTON, M. J.; HABERL, J. S.; YAN, W., Developing a physical BIM library for building thermal energy simulation. **Automation in Construction**, v. 50, p. 16–28, 2015.

KIM, K.; KIM, G.; YOO, D.; YU, J., Semantic material name matching system for building energy analysis, **Automation in Construction**. v. 30, p. 242–255, 2013.

KIM, S., WOO, J., Analysis of the differences in energy simulation results between building information modeling (BIM)-based simulation method and the detailed simulation method. In: Winter Simulation Conference (WSC), p. 3545-3556, dez. 2011, Phoenix - AZ. **Proceedings...** Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org>>, Acesso em: 10 set. 2015.

KIM, H.; SHEN, Z.; KIM, I.; KIM, K.; STUMPF, A.; YU, J., BIM IFC information mapping to building energy analysis (BEA) model with manually extended material information. **Automation in Construction**, 2016.

KOTA S.; HABERL, J. S.; CLAYTON, M. J.; YAN, W., Building Information Modeling (BIM)-based daylighting simulation and analysis. **Energy and Buildings**, v. 81, p. 391–403, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 12 nov. 2016.

KRIEGER, E.; NIES, B.; **Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modeling**, Wiley Publishing, Indianapolis - IN, 2008.

KUMAR, S., **Interoperability between building information models (BIM) and energy analysis programs. A comparative study**, (Tese Mestrado), 2008, p. 160. University of Southern California, California.

KUO, H.-J.; HSIEH, S.-H.; GUO, R.-C.; CHAN, C.-C., A verification study for energy analysis of BIPV buildings with BIM. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 676–691, 2016.

LABEEE – LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Arquivos climáticos em formato TRY, SWERA, CSV e BIN**. Florianópolis. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>>. Acesso em: 25 nov 2015.

LAGÜELA, S.; DÍAZ-VILARIÑO, L.; ARMESTO, J.; ARIAS, P., Non-destructive approach for the generation and thermal characterization of an as-built BIM, **Journal of Construction and Building Materials**, v. 51: 55 - 61, 2014.

LAISERIN, J.; **Introduction of BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors**. John Wiley & Sons, New Jersey, 2008.

LAM, K. P.; KARAGUZEL, O. T.; ZHANG, R.; ZHAO, J.; Identification and analysis of interoperability gaps between NBIMS/Open standards and building performance simulation tools. In: GPICUB – Greater Innovation Cluster of Energy-Efficient Buildings, fev. 2012, Philadelphia - PA. **Proceedings...** Disponível em: <<https://www.andrew.cmu.edu>>. Acesso em: 24 set 2015.

LAMBERTS, R., CARLO, J. **Uma discussão sobre a regulamentação de eficiência energética em edificações**. 2004. Artigo LabEEE. Disponível em <www.labeee.ufsc.br>. Acesso em: 15 set 2008.

LAMBERTS, R., DUTRA, L., PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3 ed. Editora ELETROBRAS/PROCEL. São Paulo, 2014. 382p.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; RAMOS, G.; **Impactos da Adequação Climática Sobre a Eficiência Energética e o Conforto Térmico de Edifícios de Escritórios no Brasil**. Florianópolis: LABEEE, 2006.

LAMBERTS, R.; GOULART, S.; CARLO, J.; WESTPHAL, F.; PONTES, R. Regulamentação de etiquetagem voluntária de nível de eficiência energética de edifícios comerciais e públicos. In: IX ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2007, Ouro Preto. **Anais**.

LARSEN, K.E., LATTKE, F., OTT, S., WINTER, S., Surveying and digital workflow in energy performance retrofit projects using prefabricated elements. **Automation and Construction**, v. 20, p. 999-1011, dez. 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 15 nov. 2015.

LEE, G.; WON, J.; HAM, S.; SHIN, Y., Metrics for quantifying the similarities and differences between IFC files, **Journal of Computing in Civil Engineering**. V. 25, 172 – 181, 2011.

LLC, OpenStudio 1.12. [S.l.] Alliance for Sustainable Energy, 2016. Disponível em: <<https://www.openstudio.net>>. Acessado em: 20/05/2017.

MAILE, T.; FISCHER, M.; BAZJANAC, V.. Building energy performance simulation tools—a life-cycle and interoperable perspective. **CIFE – Center for Integrated Facility Engineering**, Stanford University, p. 1-50, 2007.

MAILE, T.; FISHER, M.; BAZJANAC, V., Building energy performance simulation tools - a life-cycle and interoperable perspective, CIFE Working Paper #WP107, Dec. 2007, Stanford University, 2007

MAILE, T.; O'DONNELL, J.; BAZJANAC, V., BIM — geometry modelling guidelines for energy performance simulation, 13th International Conference of the International Building Performance Simulation Association (IBPSA), August 25–28, 2013. Chambéry, France, 2013, pp. 3242–3249.

MAIOLI, R. N.; **Avaliação da influência do dispositivo prateleira de luz no conforto visual em edificação comercial com entorno obstruído**, 2014, 133 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES.

MALTESE, S.; TAGLIABUE, L. C.; CECCONI, F. R.; PASINI, D.; MANFREN, M.; CIRIBINI, A. L. C., Sustainability assessment through green BIM for environmental, social and economic efficiency. **Procedia Engineering**, v. 180, p. 520 – 530, 2017.

MARTINS, P. C. F.; **A interoperabilidade entre sistemas BIM e simulação ambiental computacional: estudos de caso**, 2011, 229 f. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília, Brasília – DF.

MARTINS, P. C. F.; SILVA, N. F., A interoperabilidade entre sistemas BIM e simulação ambiental computacional: estudo de caso. In: III SBQP – Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído e VI TIC – Encontro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção, p. 1069-1080, 2013. Campinas, São Paulo.

McGRAW HILL C., Green BIM - How building information modeling is contributing to green design and construction, SmartMarket Report – Design & Construction Intelligence, p. 1-56, New York, NY, 2010

McGRAW HILL C.; **Building Information Modeling (BIM): Transforming Design and Construction to Achieve Greater Industry Productivity**, SmartMarket Report – Design & Construction Intelligence, p. 1-48, New York, NY, 2008.

McGRAW HILL C.; **Interoperability in the Construction Industry**, SmartMarket Report – Design & Construction Intelligence, p. 1-36, New York, NY, 2007.

MIETTINEN, R., PAAVOLA, S., Beyond the BIM utopia: Approaches to the development and implementation of building information modeling. **Automation in Construction**, v. 43, p. 84-91, jul. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 18 nov. 2015.

MOON, H. J.; CHOI, M. S.; KIM, S. K.; RYU, S. H., Case studies for the evaluation of interoperability between a BIM based architectural model and building performance analysis programs, **Proceedings of Building Simulation: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association**, p. 1521 – 1526, Sydney, 2011. Disponível em: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2011/P_1510.pdf>, acessado em maio 2016.

MOTAWA, I.; CARTER, K., Sustainable BIM-based Evaluation of Buildings. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 74, p. 419 – 428, 2013.

NEVES, R. P. A. A.; CARAN, R. M. Identificação das tecnologias para conforto ambiental e eficiência energética utilizada pelos chamados edifícios inteligentes. In: Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído, 7, Conferência Latino-americana sobre Conforto e Desempenho Energético de Edificações, 3, ENCAC-COTEDI. **Anais**. ANTAC. Curitiba-PR, 2003

O'DONNELL, J.; MAILE, T.; ROSE, C.; MRAZOVIC, N.; MORRISSEY, E.; REGNIER, C.; PARRISH, P.; BAZJANAC, V., Transforming BIM to BEM: generation of building geometry for the NASA Ames sustainability base BIM, LBNL Report #LBNL-6033E, University of California, Berkeley, 2013.

O'DONNELL, J.; SEE, R.; ROSE, C.; MAILE, T.; BAZJANAC, V.; HAVES, P., SimModel: a domain data model for whole building energy simulation, 12th International Conference of the International Building Performance Simulation Association (IBPSA), November 14–16, 2011. Sydney, Australia, 2011, pp. 382–389.

OH, M.; LEE, J.; HONG, S. W.; JEONG, Y., Integrated system for BIM-based collaborative design, **Automation in Construction** v. 58: 196 - 206, 2015.

Oliveira, E., Scheer, S., & Tavares, S. F., Avaliação de impactos ambientais pré-operacionais em projetos de edificações e a modelagem da informação da construção. Paper presented at the VII Encontro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção (TIC 2015), Recife.

OSELLO, A.; CANGIALOSI, G.; DALMASSO, D.; DI PAOLO, A.; LO TURCO, M.; CAXIAS, P.; VOZZOLA, M.; Architecture data and energy efficiency simulations: BIM and interoperability standards. IN: Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 2011. **Proceedings...** Disponível em: <<http://ibpsa.org>>. Acesso em: 10 dez 2015.

OWOLABI, A., ANUMBA, C. J., EL-HAMALAWI, A., Architecture for implementing IFC-based online construction product libraries, *ITcon Special Issue IFC-models for the AEC arena*, 2003, p. 201–218.

PAZLAR, T.; TURK, Ž., Evaluation of IFC optimization, **Proceedings of CIB W78 Conference on Bringing ITC Knowledge to Work**, p. 61 – 66, 2007.

PAZLAR, T.; TURK, Ž., Interoperability in practice: geometric data exchange using the IFC standard, **ITcon** v. 13: 362 – 380, 2008.

PRADA-HERNÁNDEZ, A. V.; ROJAS-QUINTERO, J. S.; VALLEJO-BORDA, J. A.; PONZ-TIENDA, J. L.; Interoperability of Building Energy Modeling (BEM) with Building Information Modeling (BIM). **SIBRAGEC – ELAGEC**, p. 519-526, 2015 – SÃO CARLOS – SP

PROCEL. **Diretrizes para obtenção do nível A para edificações comerciais, de serviços e públicas**, v. 1. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2014. Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/node/39>>. Acesso em: 25 nov. 2015.

PROCEL. **Manual para Aplicação do RAC**, v. 1. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2013. Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/node/39>>. Acesso em: 25 nov. 2015.

PROCEL. **Manual para Aplicação do RTQ-C**, v. 4. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2016. Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/node/39>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

PROCEL. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C)**. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2014. Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/node/38>>. Acesso em: 25 nov. 2015.

PROCEL. **Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações Residencial, Comercial, de Serviço e Público (RAC)**. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2013. Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/node/38>>. Acesso em: 25 nov. 2015.

RIBEIRO, J. T. G.; **Modelagem de informações de edificações aplicada no processo de projeto de aeroportos**, 2009. 133 f. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília, Brasília/DF.

Roriz, M. **Segunda proposta de revisão do zoneamento bioclimático do Brasil**, São Carlos, SP. Agosto de 2012. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Zoneamento.pdf>. Acesso em: 25 set 2016.

RUIZ, A. G.; **Eficiência energética na construção civil**. 2014. Disponível em: <<http://www.brasilengenharia.com/portal/noticias/noticias-da-engenharia/7653-eficienciaenergetica-na-construcao-civil>>. Acesso em: 25 out 2015.

SANGUINETTI, P.; EASTMAN, C.; AUGENBROE, G., Courthouse energy evaluation: bim and simulation model interoperability in concept design. In: **Proceedings of the Building Simulation**, Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, 1922 - 1929, 2009.

SANTOS, I. G.; **Análise de envoltória e do sistema de iluminação a partir do “Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos” para avaliação de desempenho de sistemas de fachada e de proteções solares**, 2009, 145 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG.

SANTOS, L. S., **Requisitos de iluminação natural nos sistemas de avaliação de edifícios e impactos energéticos em edificações comerciais no Brasil**, 2012, 120 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES.

SCHLUETER, A.; THESELING, F.; Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages. **Automation and Construction**, v. 18, p. 153-163, mar. 2009 Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

SHEN, W.; HAO, Q.; MAK, H.; NEELAMKAVIL, J.; XIE, H.; DICKINSON, J.; THOMAS, R.; PARDASANI, A.; XUE, H.; Systems integration and collaboration in architecture, engineering, construction, and facilities management: A review. **Advanced Engineering Informatics**, v. 24, p. 196 - 207, 2010.

SHOUBI, M. V.; SHOUBI, M. V.; BAGCHI, A.; BAROUGH, A. S.; Reducing the operational energy demand in buildings using building information modeling tools and sustainability approaches. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 6, p. 41-55, mar. 2015 Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

SHOUBI, M. V.; SHOUBI, M. V.; BAGCHI, A.; BAROUGH, A. S.; Reducing the operational energy demand in buildings using building information modeling tools and sustainability approaches. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 6, p. 41–55, mar. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 28 nov. 2015.

SOKOLOV, I.; CROSBY, J., Utilizing gbXML with AECOsim Building Designer and speedikon, Bentley, 2011.

STEHLING, M. P.; **A utilização de modelagem da informação da construção em empresas de arquitetura e engenharia de Belo Horizonte**, 2012, 153 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG.

SUCCAR, B.; Building information modeling framework: a research and delivery foundation for industry stakeholders. **Automation and Construction**, v. 18, p. 357–375, mai. 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 22 nov. 2015.

TRIMBLE, SketchUP 2017. [S.I.] Trimble Inc., 2017. Disponível em: <<https://www.sketchup.com/pt-BR>>. Acessado em: 25/05/2017.

TSE, T. K.; WONG, K. A.; The utilization of building information models in nD modelling: a study of data interfacing and adoption barriers. **ITcom**, v. 10, p. 85-102, abr. 2005. Disponível em: <http://itcon.org/cgi-bin/works/Show?2005_8>. Acesso em: 23 nov 2015.

U.S. General Services Administration. **Energy Performance: GSA BIM Guide 05** v. 2.1, 76 f, jun. 2015. Washington, DC. Disponível em: <<http://www.gsa.gov/portal/content/102283>>. Acesso em: 13 dez 2015.

U.S. General Services Administration. **GSA BIM Guide Series 1**, v. 0.60, 41 f, mai. 2007. Washington, DC. Disponível em: <<http://www.gsa.gov/portal/content/102283>>. Acesso em: 13 dez 2015.

VERNADAT, F.; CHEN, D.; DOUMEINGTS, G., Architectures for enterprise integration and interoperability: Past, present and future, **Computers in Industry** v. 59: 647 - 659, 2008.

WELLE, B.; ROGERS, Z.; FISCHER, M., BIM-Centric Daylight Profiler for Simulation (BDP4SIM): A methodology for automated product model decomposition and recomposition for climate-based daylighting simulation. **Building and Environment**, v. 58, p. 114–134, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 12 nov. 2016.

WON, J.; LEE, G., Algorithm for efficiently extracting IFC building elements from an IFC building model, **Proceedings of ASCE International Workshop on Computing in, Civil Engineering**, p. 713 - 719 2011.

WONG, J. K. W.; LIA, H.; WANGB, S. W., Intelligent building research: a review, **Automation in Construction** v. 14: 143 - 159, 2005.

ZHANG, L.; ISSA, R., Ontology based partial building information model extraction, **Journal of Computing in Civil Engineering** v. 27: 576 – 584, 2013.

APÊNDICE A: – MÉTODO PRESCRITIVO: MODELO REFERÊNCIA

INDICADOR DE CONSUMO DA ENVOLTÓRIA

$$A_{pe} \leq 450,00\text{m}^2$$

$$FF_{\text{máx}} = 0,48$$

$$IC_{\text{env}} = 454,47.FA - 1641,37.FF + 33,47.PAFT + 7,06.FS + 0,31.AVS - 0,29.AHS - 1,27.PAFT.AVS + 0,33.PAFT.AHS + 718$$

Dados para o IC _{env} Zona Bioclimática: 8 Vitória/ES		IC _{env} = 426,02	Intervalo dos níveis de eficiência (i):	
A =	0,08		$i = \frac{IC_{\text{máxD}} - IC_{\text{mín}}}{4}$	
FF =	0,21			
PAF _T =	0,25		i = 4,14	
FS =	0,62			
AVS =	0,00			
AHS =	0,00			
Parâmetros do IC _{máxD}		IC _{máxD} = 437,75		
PAF _T =	0,60			
FS =	0,61			
AVS =	0,00			
AHS =	0,00			
Parâmetros do IC _{mín}		IC _{mín} = 421,18		
PAF _T =	0,05			
FS =	0,87			
AVS =	0,00			
AHS =	0,00			
Percentual de Abertura da Fachada (PAF)		Área abertura Fachada Oeste (m²)		
PAF =	$\frac{\sum \text{Área de Abertura}}{\sum \text{Área de Fachada}}$		A _{abertura} =	A _{vidros} = 15,86
			PAF _{oeste} =	2,58% 0,0258
Área abertura Fachada Norte (m²)		Área abertura Fachada Leste (m²)		
A _{abertura} =	A _{vidros} =	475,42	A _{abertura} =	A _{vidros} = 15,86
PAF _{norte} =	38,75%	0,3875	PAF _{leste} =	2,58% 0,0258
Área abertura Fachada Sul (m²)				
A _{abertura} =	A _{vidros} =	403,92		
PAF _{sul} =	32,92%	0,3292		
Percentual de Abertura da Fachada (PAF _{total})		Fator Altura (FA)		Fator Forma (FF)
PAF _{total} =	$\frac{\sum \text{Área de Abertura Total}}{\sum \text{Área de Fachada Total}}$		(FA) =	A _{pcob} (FF) = A _{env}
				A _{tot} V _{tot}
PAF _{total} =	24,75%	0,2475	(FA) =	0,08 (FF) = 0,21

Limites dos intervalos dos níveis de eficiência

Eficiência	A	B	C	D	E
Lim Mín	-	$IC_{máxD} - 3i + 0,01$	$IC_{máxD} - 2i + 0,01$	$IC_{máxD} - i + 0,01$	$IC_{máxD} + 0,01$
Lim Máx	$IC_{máxD} - 3i$	$IC_{máxD} - 2i$	$IC_{máxD} - i$	$IC_{máxD}$	-

Eficiência	A	B	C	D	E
Lim Mín	-	425,33	429,47	433,62	437,76
Lim Máx	425,32	429,46	433,61	437,75	-

Comparação entre os limites de transmitância e os dados da edificação – Zona Bioclimática 8.

Dados	Nível A	Nível B	Nível C e D	Edifício
Transmitância parede*	$\leq 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$	
Transmitância parede**	$\leq 3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$	1,189
Transmitância cobertura (C)	$\leq 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$	3,743
Transmitância cobertura (NC)	$\leq 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$	
* $C_T \leq 80 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ ** $C_T > 80 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ C - Climatizado NC - Não Climatizado				

Comparação entre os limites de absortância e os dados da edificação

Dados	Nível A	Nível B	Nível C e D	Edifício
Absortância parede	$< 0,5$	-	-	0,158
Absortância cobertura (C)	$< 0,5$	$< 0,5$	-	0,716

**ALVENARIA: REBOCO + BLOCO CERÂMICO 6 FUROS (09x14x24)
COM ARGAMASSA + REBOCO
RESISTÊNCIA TOTAL E TRANSMITÂNCIA (ASHRAE - Fundamentals 2013)**

Transmitância Total Alvenaria (U_T) $W/(m^2K)$ = 1,189

Cálculo das Resistências por componentes

	Espessura (e) (m)	condutividade térmica (λ) ($W/(m.K)$)	Resistência (e/λ) (m^2K/W)
R_{Reb} (Resistência do Reboco)	0,025	1,150	0,0217
R_{Arg} (Resistência da Argamassa)	0,090	1,150	0,0783
R_f (Resistência Faces Bloco Cerâmico)	0,007	0,900	0,0156
R_{Vint} (Resistência Vertical interna Bloco Cerâmico)	0,006	0,900	0,0200
R_{Hint} (Resistência Horizontal interna Bloco Cerâmico)	0,076	0,900	0,1689
R_{Hext} (Resistência Horizontal externa Bloco Cerâmico)	0,076	0,900	0,1689
R_{ar} (Resistência das Câmaras de Ar)			0,9600

Cálculo da Resistência Interna do Bloco Cerâmico (R_{int}) (m^2K/W)

	Área unit. (m^2)	Área total (m^2)	
A_{Vint}	0,0091	0,0274	R_{int} (m^2K/W) = 0,7076
A_{hint}	0,0014	0,0029	
A_{hext}	0,0017	0,0034	
A_{ar}	0,0013	0,0080	

Cálculo da Resistência Total do Bloco Cerâmico ($R_{Tij} = R_f + R_{int}$) (m^2K/W)

R_{Tij} (m^2K/W) = 0,7231

Cálculo da Resistência (R_{conj}) e Condutividade Térmica (λ_{conj}) para o conjunto Bloco Cerâmico e Argamassa em relação à área do conjunto

A_{tij} (m^2) =	(14x24) = 0,0336	0,8517	85,17%
A_{arg} (m^2) =	(1,5x24)+(1,5x15) = 0,01	0,1483	14,83%

$$R_{conj} = (0,8517 \times 0,2329) + (0,1483 \times 0,0783)$$

R_{conj} (m^2K/W) = 0,6275

$$\lambda_{conj} = (0,09/0,2100)$$

λ_{conj} $W/(m.K)$ = 0,1434

Resistência Térmica Alvenaria ($R_T = R_{Si} + R_{Reb} + R_{conj} + R_{Reb} + R_{Se}$) (m^2K/W)

Resistência térmica superf. Int. (R_{Si}) (m^2K/W) = 0,13	Horizontal
Resistência térmica superf. ext. (R_{Se}) (m^2K/W) = 0,04	Horizontal

Resistência térmica alvenaria (R_t) (m^2K/W) = 0,8410

COBERTURA: LAJE CONCRETO
RESISTÊNCIA TOTAL E TRANSMITÂNCIA (ASHRAE - Fundamentals 2013)

Transmitância Total Cobertura (U_T) $W/(m^2K)$ = 3,7433

Cálculo das Resistências por componentes

	Espessura (e) (m)	condutividade térmica (λ) ($W/(m.K)$)	Resistência (e/λ) (m^2K/W)
R_{Conc} (Resistência do Concreto)	0,100	1,750	0,0571

Resistência Térmica Cobertura ($R_T = R_{Si} + R_{Reb} + R_{Conj} + R_{Reb} + R_{Se}$) (m^2K/W)

Resistência térmica superf. Int. (R_{Si} (m^2K/W)) = 0,170 **Descendente**

Resistência térmica superf. ext. (R_{Se} (m^2K/W)) = 0,040 **Descendente**

Resistência térmica alvenaria (R_t (m^2K/W))= 0,2671

APÊNDICE B: – MÉTODO PRESCRITIVO: MODELO AJUSTADO

INDICADOR DE CONSUMO DA ENVOLTÓRIA

$$A_{pe} \leq 450,00\text{m}^2$$

$$FF_{\text{máx}} = 0,48$$

$$IC_{\text{env}} = 454,47.FA - 1641,37.FF + 33,47.PAFT + 7,06.FS + 0,31.AVS - 0,29.AHS - 1,27.PAFT.AVS + 0,33.PAFT.AHS + 718$$

Dados para o IC _{env} Zona Bioclimática: 8 Vitória/ES		IC _{env} = 423,83	Intervalo dos níveis de eficiência (i):	
FA =	0,08		i =	$\frac{IC_{\text{máxD}} - IC_{\text{mín}}}{4}$
FF =	0,21			
PAF _T =	0,25			
FS =	0,31		i =	4,14
AVS =	0,00			
AHS =	0,00			
Parâmetros do IC _{máxD}		IC _{máxD} = 437,75		
PAF _T =	0,60			
FS =	0,61			
AVS =	0,00			
AHS =	0,00			
Parâmetros do IC _{mín}		IC _{mín} = 421,18		
PAF _T =	0,05			
FS =	0,87			
AVS =	0,00			
AHS =	0,00			
Percentual de Abertura da Fachada (PAF)		Área abertura Fachada Oeste (m²)		
PAF =	$\frac{\sum \text{Área de Abertura}}{\sum \text{Área de Fachada}}$	A _{abertura} =	A _{vidros} =	15,86
		PAF _{oeste} =	2,58%	0,0258
Área abertura Fachada Norte (m²)		Área abertura Fachada Leste (m²)		
A _{abertura} =	A _{vidros} =	475,42	A _{abertura} =	A _{vidros} = 15,86
PAF _{norte} =	38,75%	0,3875	PAF _{leste} =	2,58% 0,0258
Área abertura Fachada Sul (m²)				
A _{abertura} =	A _{vidros} =	403,92		
PAF _{sul} =	32,92%	0,3292		
Percentual de Abertura da Fachada (PAF _{total})		Fator Forma (FF) Fator Altura (FA)		
PAF _{total} =	$\frac{\sum \text{Área de Abertura Total}}{\sum \text{Área de Fachada Total}}$	(FF) =	$\frac{A_{\text{env}}}{V_{\text{tot}}}$	(FA) = $\frac{A_{\text{pcob}}}{A_{\text{tot}}}$
		(FF) =	0,21	(FA) = 0,08

Limites dos intervalos dos níveis de eficiência

Eficiência	A	B	C	D	E
Lim Mín	-	$IC_{máxD} - 3i + 0,01$	$IC_{máxD} - 2i + 0,01$	$IC_{máxD} - i + 0,01$	$IC_{máxD} + 0,01$
Lim Máx	$IC_{máxD} - 3i$	$IC_{máxD} - 2i$	$IC_{máxD} - i$	$IC_{máxD}$	-

Eficiência	A	B	C	D	E
Lim Mín	-	425,33	429,47	433,62	437,76
Lim Máx	425,32	429,46	433,61	437,75	-

Comparação entre os limites de transmitância e os dados da edificação – Zona Bioclimática 8.

Dados	Nível A	Nível B	Nível C e D	Edifício
Transmitância parede*	$\leq 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$	
Transmitância parede**	$\leq 3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$	0,338
Transmitância cobertura (C)	$\leq 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$	0,965
Transmitância cobertura (NC)	$\leq 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$	
* $C_T \leq 80 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	** $C_T > 80 \text{ kJ/m}^2\text{K}$			
C - Climatizado	NC - Não Climatizado			

Comparação entre os limites de absortância e os dados da edificação

Dados	Nível A	Nível B	Nível C e D	Edifício
Absortância parede	< 0,5	-	-	0,158
Absortância cobertura (C)	< 0,5	< 0,5	-	0,250

ALVENARIA: REBOCO + BLOCO CONCRETO 2 FUROS (09x19x39) COM ARGAMASSA + REBOCO
RESISTÊNCIA TOTAL E TRANSMITÂNCIA (ASHRAE - Fundamentals 2013)

Transmitância Total Alvenaria (U_T) $W/(m^2K) = 0,3381$

Cálculo das Resistências por componentes

	Espessura (e) (m)	condutividade térmica (λ) (W/(m.K))	Resistência (e/ λ) (m^2K/W)
R_{Reb} (Resistência do Reboco)	0,025	1,150	0,0217
R_{Arg} (Resistência da Argamassa)	0,090	1,150	0,0783
R_f (Resistência Faces Bloco Concreto)	0,020	1,750	0,0229
R_{Vint} (Resistência Vertical interna Bloco Concreto)	0,050	1,750	0,0857
R_{ar} (Resistência das Câmaras de Ar)			0,3200

Cálculo da Resistência Interna do Bloco Concreto (R_{int}) (m^2K/W)

	Área unit. (m^2)	Área total (m^2)	
A_{vint}	0,0038	0,0114	$R_{int} (m^2K)/W = 3,0401$
A_{ar}	0,0314	0,0627	

Cálculo da Resistência Total do Bloco Concreto ($R_{Tij} = R_f + R_{int}$) (m^2K/W)

$R_{Tij} (m^2K)/W = 3,0629$

Cálculo da Resistência (R_{conj}) e Condutividade Térmica (λ_{conj}) para o conjunto Bloco Concreto e Argamassa em relação à área do conjunto

$A_{tij} (m^2) =$	$(19 \times 39) = 0,0741$	0,8933	89,33%
$A_{arg} (m^2) =$	$(1,5 \times 19) + (1,5 \times 40) = 0,0089$	0,1067	10,67%

$$R_{conj} = (0,8933 \times 2,1877) + (0,1067 \times 0,0783)$$

$R_{conj} (m^2K)/W = 2,7445$

$$\lambda_{conj} = (0,09 / 1,9626)$$

$\lambda_{conj} W/(m.K) = 0,0328$

Resistência Térmica Alvenaria ($R_T = R_{Si} + R_{Reb} + R_{conj} + R_{Reb} + R_{Se}$) (m^2K/W)

Resistência térmica superf. Int. ($R_{Si} (m^2K)/W$) = 0,13 Horizontal

Resistência térmica superf. ext. ($R_{Se} (m^2K)/W$) = 0,04 Horizontal

Resistência térmica alvenaria ($R_t (m^2K)/W$) = 2,9580

COBERTURA: LAJE CONCRETO + TELHADO VEGETADO
RESISTÊNCIA TOTAL E TRANSMITÂNCIA (ASHRAE - Fundamentals 2013)

Transmitância Total Cobertura (U_T) $W/(m^2K)$ = 0,9649

Cálculo das Resistências por componentes

	Espessura (e) (m)	condutividade térmica (λ) ($W/(m.K)$)	Resistência (e/λ) (m^2K/W)
R_{Arg} (Resistência da Terra Argilosa)	0,400	0,520	0,7692
R_{Conc} (Resistência do Concreto)	0,100	1,750	0,0571

Resistência Térmica Cobertura ($R_T = R_{Si} + R_{Reb} + R_{Conj} + R_{Reb} + R_{Se}$) (m^2K/W)

Resistência térmica superf. Int. (R_{Si} (m^2K/W)) = 0,170 Descendente

Resistência térmica superf. ext. (R_{Se} (m^2K/W)) = 0,040 Descendente

Resistência térmica alvenaria (R_t (m^2K/W)) = 1,0364